

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra materiálu

Studijní program: M 2301 – Strojní inženýrství

Studijní obor: 2303 T 002 – Strojírenská technologie

Zaměření: Materiálové inženýrství

**Analýza vlivu chemicko – tepelného zpracování
konstrukčních ocelí na tribologické vlastnosti povrchů**

*The influence of thermo-chemical treatment of constructional
steel on tribological properties of the surface*

KMT – 242

Agnieszka Gamrot

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. František Stuchlík, CSc.

Konzultant diplomové práce: dr. Ing. Robert Pietrasik

Liberec 2008



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení	Agnieszka GAMROT
studijní program	M2301 Strojní inženýrství
obor	2303 T 002 Strojírenská technologie
zaměření	Materiálové inženýrství

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. O vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

Analýza vlivu chemicko-tepelného zpracování konstrukčních ocelí na tribologické vlastnosti povrchů

Zásady pro vypracování:

(uveďte hlavní cíle magisterské práce a doporučené metody pro vypracování)

Zásady pro vypracování:

1. V teoretické části se seznámte s vhodnými procesy chemicko-tepelného zpracování a metodami a zařízeními pro zkoušení tření a opotřebení.
2. Z vybraného materiálu navrhnete tvar a rozměry vzorků, vzorky vyrobte a opatřete jejich povrch vhodnou vrstvou
3. Na takto připravených vzorcích analyzujete tloušťku vrstvy, tvrdost a proved'te metalografické šetření.
4. Proved'te měření opotřebení a koeficientu tření (zařízení Pin-on-disk)
5. Získané výsledky vyhodnot'te z hlediska technického, ekonomického a ekologického a doporučte další postup zkoumání dané problematiky.

Forma zpracování diplomové práce:

- průvodní zpráva v rozsahu 40-50 stran
- přílohy

Seznam literatury (uveďte doporučenou odbornou literaturu):

[1] KULA P.: Inżynieria warstwy wierzchniej. Monografie. Wyd. Politechniki Łódzkiej, Łódź 2002

[2] LAWRONSKI Z.: Tarcie, zużywanie i smarowanie. PWN, Warszawa 1993

[3] SZCZEREK M., Wiśniewski M. Tribologia i tribotechnika. Instytut Technologii Eksploatacji, Radom 2000

[4] GAWRONSKI Z.: Technologiczna warstwa wierzchnia w kołach zębatych i mechanizmach krzywkowych. Monografie. Wyd. Politechniki Łódzkiej, Łódź 2005

[5] GJULIHANDANOW J.L., BUDZYNOWSKI T.W.: Nawęglanie, wegloazotowanie, azotowanie stali : zagadnienia wybrane. Wydaw. Politechniki Radomskiej, 2003.

Vedoucí diplomové práce:	doc.Ing.František Stuchlík,CSc
Konzultant diplomové práce:	Dr.Ing. Robert Pietrasik

L.S.

doc.Ing.František STUCHLÍK,CSc.
vedoucí katedry

prof.Ing.Petr LOUDA,CSc.
děkan

V Liberci dne 31.03.2008

Platnost zadání diplomové práce je 15 měsíců od výše uvedeného data (v uvedené lhůtě je třeba podat přihlášku ke SZZ). Termíny odevzdání diplomové práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.

Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum:

.....

Agnieszka Gamrot

Poděkování

Vyjadřuji nesmírné poděkování doc. Ing. Františku Stuchlíkovi a také rovněž dr Ing. Robertu Pietrašíkovi za čas mně věnovaný a poskytnutí cenných informací nezbytných k napsání mé práce.

Upřímné poděkování rovněž patří mgr Ing. Damianu Batorovi, dr Ing. Jacku Grabarčíkovi, mgr. Ing. Zbigniewu Rožkovi a také mgr. Ing. Mateušu Fijałkovskému za prokázanou přízeň a nesmírnou podporu.

Slova vděčnosti vyjadřuji všem osobám, které nelze vyjmenovat a které přispěly ke vzniku této práce.

Anotace

Magisterská práce se zabývá vlivem chemicko - tepelného zpracování konstrukční oceli na tribologické vlastnosti povrchů.

V teoretické části bylo popsáno použití chemicko-tepelného zpracování a zároveň byly charakterizovány metody a testovací zařízení pro zkoušky tření a opotřebení. V praktické části se nachází řada základních zkoušek provedených na vzorcích vystavených sulfonitridaci a karbonitridaci. Tyto zkoušky charakterizovaly vlastnosti vytvořených povrchových vrstev. V další části byla provedena diskuze na téma získaných výsledků.

Klíčová slova: sulfonitridace, karbonitridace, tribologie

Annotation

The master's thesis deals with the influence of thermo-chemical treatment of constructional steel on tribological properties of the surface.

In the theoretical part thermal-chemical treatments used are described as well as methods and test equipment for friction and wear testing are specified. The practical part contains a series of basic examinations carried out on samples that were carbonitriding and sulfonitriding. These tests specified the properties of created surface layers. In the next part the discussion about obtained results is carried out.

Key words: sulfonitriding, carbonitriding, tribology

Seznam použitých zkratek a symbolů

<i>PVD</i>	<i>ang. Physical Vapour Deposition</i>	Fyzická depozice z plynné fáze
<i>CVD</i>	<i>ang. Chemical Vapour Deposition</i>	Chemická depozice z plynné fáze
<i>TWW</i>	<i>ang. Technological topcoat</i>	Technologická vrchní vrstva
<i>°C</i>	<i>ang. Celsius</i>	Stupeň Celsia
<i>%</i>	<i>ang. Percent</i>	Procento
<i>γ'</i>	<i>ang. Iron nitride Fe₄N</i>	Nitrid železa Fe₄N
<i>ε</i>	<i>ang. Iron nitride Fe₂₋₄N</i>	Nitrid železa Fe₂₋₄N
<i>h</i>	<i>ang. Hour</i>	Hodina
<i>C</i>	<i>ang. Carbon</i>	Uhlík
<i>BaCO₃</i>	<i>ang. Barium carbonate</i>	Uhličitan barnatý
<i>FeS</i>	<i>ang. Iron sulfide</i>	Sírník železnatý
<i>CH₄</i>	<i>ang. Methane</i>	Methan
<i>NH₃</i>	<i>ang. Ammonia</i>	Čpavek
<i>HV</i>	<i>ang. Vickers hardness</i>	Tvrdost podle Vickerse

Obsah

I. Úvod	10
II. Teoretická část	11
2.1. Chemicko-tepelné zpracování	11
2.1.1. Cementování	13
2.1.2. Nitridování	17
2.1.3. Sulfonitridování v plynném prostředí	23
2.1.4. Karbonitridování	25
2.1.5. Boridování oceli	27
2.1.6. Difúzní pokovování	28
2.1.7. Speciální metody komplexního chemicko-tepelného zpracování	30
2.2. Tribologické zkoušky jako informační zdroj	31
2.2.1. Klasifikace a charakteristika tribologických zkoušek	31
2.2.2. Testovací metody a zařízení ke zkouškám tření a opotřebení	34
2.3. Metodika zkoušek	43
2.3.1. Zkušební materiál	43
2.3.2. Schéma pracoviště chemicko-tepelného zpracování	44
2.3.3. Pracoviště zkoušek mikrotvrdosti	45
2.3.4. Pracoviště optické mikroskopie	45
2.3.5. Pracoviště tribologických zkoušek	46
2.3.6. Pracoviště kvalitativní rentgenové mikroanalýzy	46
III. Praktická část	47
3.1. Výsledky zkoušek	47
3.1.1. Parametry zadané během vytváření povrchové vrstvy	47
3.1.2. Mikrostruktura zkoušených povrchových vrstev a jádra	49
3.1.3. Zkoušky mikrotvrdosti	51
3.1.4. Měření tloušťky povrchových vrstev	52
3.1.5. Tribologické zkoušky	53
3.1.6. Kvalitativní rentgenová mikroanalýza povrchových vrstev	56

<i>IV. Diskuze k výsledkům</i>	57
<i>V. Závěry</i>	58
<i>VI. Seznam obrázků</i>	60
<i>VII. Seznam tabulek</i>	62
<i>VIII. Použitá literatura</i>	63



I. Úvod

Naukou o tření a jeho procesech je tribologie, jejíž oblast se neomezuje pouze na procesy tření ve strojích, ale rovněž zahrnuje procesy vyskytující se v přírodě a technice. Ve světovém měřítku je asi 30 - 50% ročně vyráběné energie pohlcováno třecím odporem. V důsledku opotřebení je vyřazeno statisíce strojů. Rychlý rozvoj vědy o tření směřuje ke zlepšení tohoto nepříznivého jevu [5].

Odolnost proti opotřebení je jednou z nejvíce žádaných vlastností materiálu, která určuje jeho pozdější praktické využití. K efektivním metodám zvyšování užitkových vlastností materiálů patří tepelné a chemicko-tepelné zpracování a také mnoho jiných metod a v tom nejnovější vrstvy nanokrystalického diamantu a karbidu křemíku. Použití vhodné chemicko-tepelné povrchové úpravy nejenže přispívá ke zlepšení odolnosti proti opotřebení a tření, ale také dává vysokou únavovou pevnost, tvrdost a větší korozní odolnost [1].

Cílem práce bylo charakterizování vlivu sulfonitridace a karbonitridace konstrukční oceli na tribologické vlastnosti povrchů. V první části této práce byly představeny základní metody používané během druhé poloviny XX. století, počínaje cementováním, nitridováním, bórováním atp., po současné sulfonitridování. V dalším bodě byly představeny různé typy testovacích zařízení tření a opotřebení a také byly charakterizovány tribologické měřicí metody. Ve třetí části byly představeny dva procesy a to sulfonitridace a karbonitridace používané v dnešní době pro zlepšení provozních vlastností strojních částí. V tomto bodě byly obsaženy charakteristické zkoušky, mezi jinými zkoušky tloušťky a tvrdosti vrstev a také byly zveřejněny výsledky měření tření a opotřebení.

II. Teoretická část

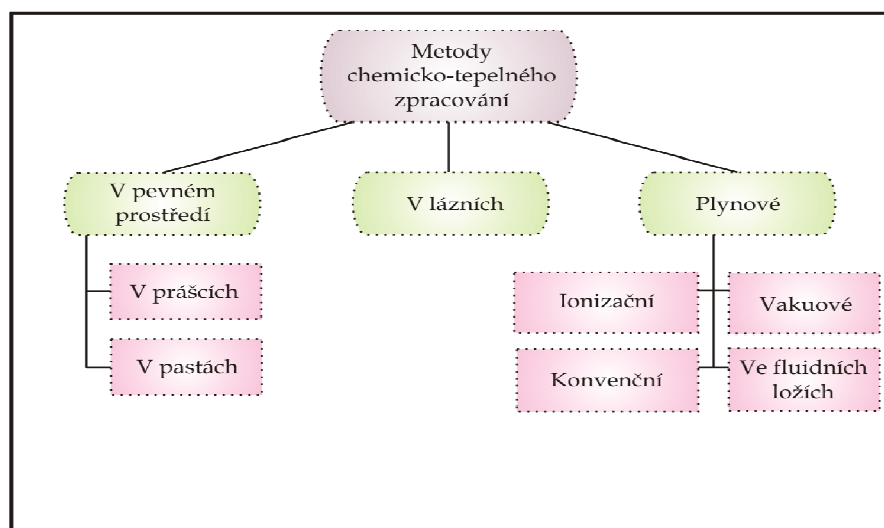
2.1. Chemicko-tepelné zpracování

Chemicko-tepelné zpracování je procesem, který spočívá v difúzním nasycení různými prvky vrchní vrstvy elementů strojů a nástroj k získání určitých mechanických, chemických a fyzických vlastností [2].

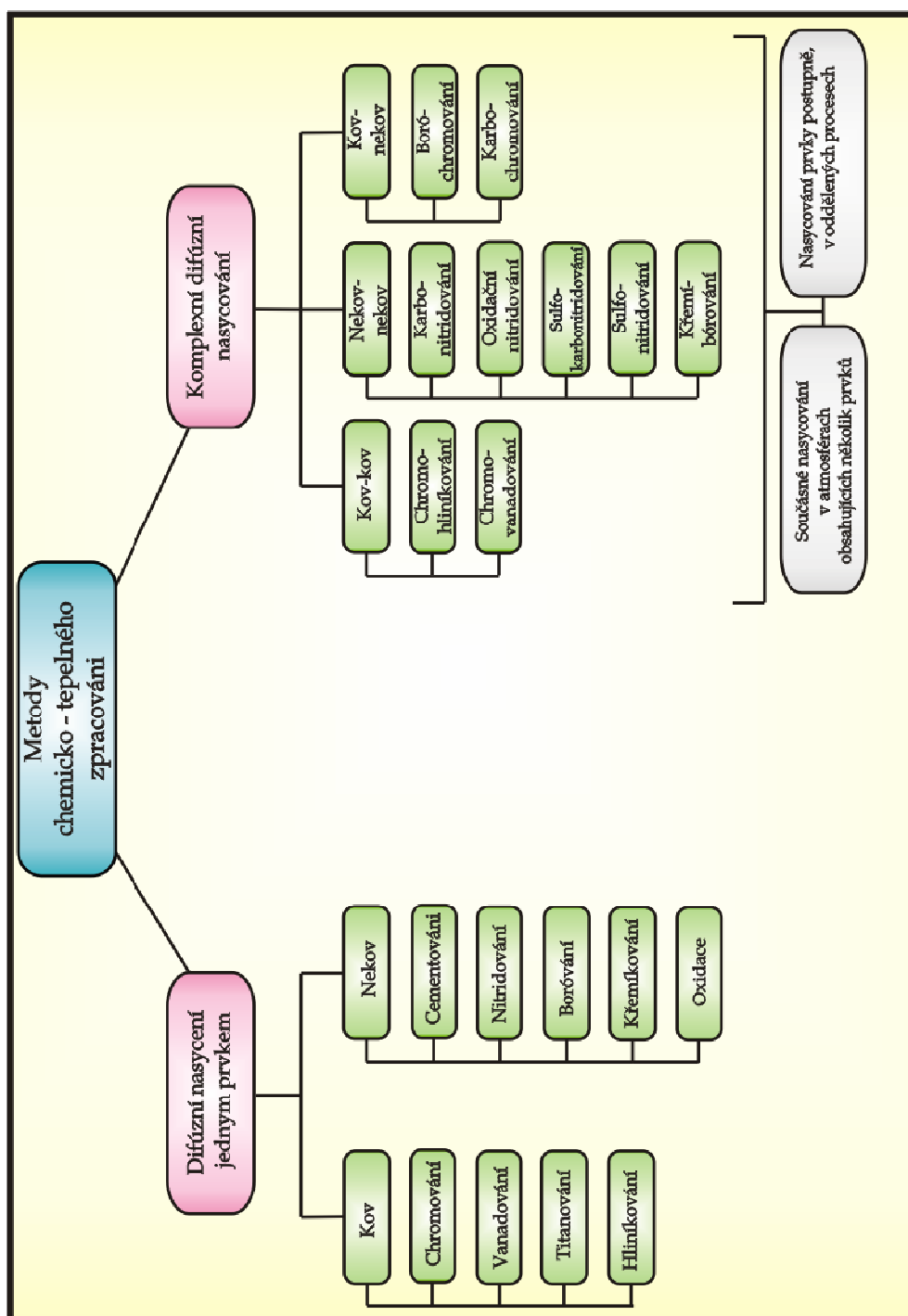
Cílem chemicko-tepelného zpracování je vytvoření vrchních vrstev o zvýšené odolnosti proti otěru a tribologickému opotřebení, zvýšené korozní a erozní odolnost a taky zvýšenou odolností proti únavě. Mezi nejpopulárnější typy chemicko-tepelného zpracování patří: cementování, nitridování, karbonitridování, bórování. Dost často se používá chrómování a hliníkování, druhů difuzního pokovování. Chrómování a hliníkování vedou k vzrůstu odolnosti proti korozi v plynech (žáruvzdornost). Navíc, chrómování zvětšuje tvrdost povrchu a odolnost proti korozi [1][2].

Metody chemicko-tepelného zpracování třídíme podle:

- stavu skupenství použitého prostředí
- typu nasyceného prvku
- teploty operace (nízkoteplotní $<600^{\circ}\text{C}$, vysokoteplotní $>600^{\circ}\text{C}$)



Obr.1. Klasifikace metod zpracování podle stavu skupenství použitého prostředí [2]



Obr.2. Klasifikace metod chemicko-tepelného zpracování podle typu nasyceného prvku [2]



2.1.1. Cementování

Cementování je difúzním procesem, který spoléhá na nasycení uhlíkem vrchní vrstvy ocelových výrobků. Proces nauhličování se koná v teplotě vyšší než A_{c3} ($880 \div 950^{\circ}\text{C}$). Doba nauhličování určuje tloušťku cementační vrstvy. Po procesu nauhličování se provádí kalení a popouštění při nízkých teplotách. Tepelné zpracování po nauhličování zajišťuje velkou tvrdost povrchu 62 – 64HRC, velkou odolnost proti opotřebení a značnou odolnost proti únavě. Ocelové jádro po operaci chemicko – tepelného zpracování charakterizuje velká houževnatost, pružnost a odolnost proti dynamickému působení zatížení. Cementování se používá v technologických procesech ozubených kol, rozvodných systémech (hřídel), pístních čepů, kroužky a hřídele valivých ložisk velkých rozměrů. K nauhličování se používá především nízkouhlíkovou ocel, obsahující méně než 0,35% uhlíku a legované prvky, takové, jako: chróm, nikl, molybden, mangan v celkovém množství do několika procent [1][2].

Cementační ocele patří mezi nejstarší procesy chemicko-tepelného zpracování a dominuje mezi procesy zpevnění povrchu používanými v málosériové (malých závodech a opravách) a velkosériové výrobě. Metody tohoto procesu rozdělujeme na konvenční a moderní jako např. vakuové nebo ionizační [2].

- **Cementování v sytkém prostředí (v prašku)**

Je to málo vydatná metoda, přesto kvůli nízkým nákladům na přístroje se ji dosud hodně používá v malých závodech a opravách. Tato metoda probíhá v prašku dřevěného uhlí ($80 \div 90\%$), který je zdrojem uhlí pro difúzní procesy a uhličitany BaCO_3 , CaCO_3 , Na_2CO_3 tak zvaných aktivátorů procesů. Součásti určené k zpevnění se umísťuje v krabicích z žáruvzdorného plechu. Předměty jsou uloženy v uzavřených krabicích a zasypány práškovou směsí mletého dřevěného uhlí a 7 až 20% uhličitany barnatého BaCO_3 (nebo Na_2CO_3).



Potom se umísťuje krabice v komoře pece a vyhřívá se ji obvykle v teplotě kolem 900°C [2]. Výhodou této metody je její jednoduchost, je možné ji používat v obyčejných plynových pecích. Nevýhodou je však dlouhá doba potřebná k ohřátí krabici spolu s obsahem a dlouhá doba stydnouti krabici s vsázkou, obvykle s pecem a rychlé opotřebení krabici [3].

- **Cementování v kapalném prostředí**

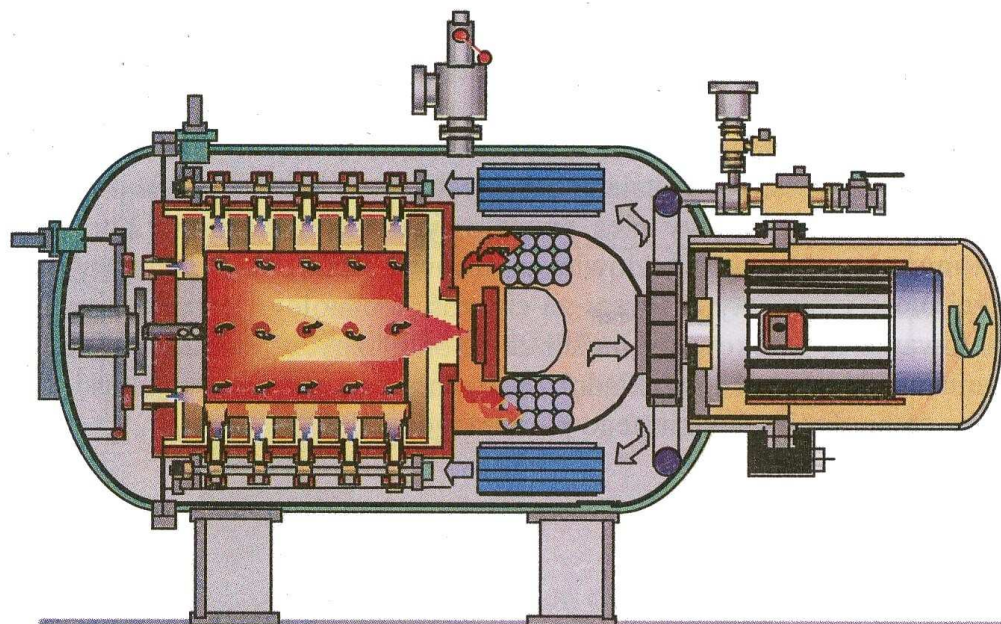
Tento proces je provozován přes ponořování obrobku v rozpuštěných solach s přísadou SiC (karborundum) např.: 75% Na₂CO₃, 15% NaCl, 10% SiC [4]. Koná se obvykle při teplotě kolem 830÷850°C. Výhodou této metody je možnost přímého kalení předmětů v cementační kapalině a krátká doba procesu. Nevýhodami jsou škodlivé působení kapaliny na životní prostředí a pracovníky, vysoké náklady na zužitkování cementačního prostředí a nutnost mýt a sušit předměty po procesu [5].

- **Cementování v plynném prostředí**

Cementování v plynném prostředí je nejčastěji používanou metodou, ale vyžaduje speciální a dost drahé přístroje. Spočívá ono v umísťování obrobků v peci a propouštění plynné atmosféry ve vhodném uhlíkového potenciálu. Cementační plyn rozbíjí se na povrchu předmětů s vyloučením aktivních atomů uhlíku, které difundují v obráběný povrch. Výhodou této metody je především možnost kontrolování procesu, šetrnost energie (není nutné nahřívání krabici), a v případě peců s nepřetržitým fungováním umožňuje provedení kalení přímo po nauhličení [4].

- **Vakuové cementování**

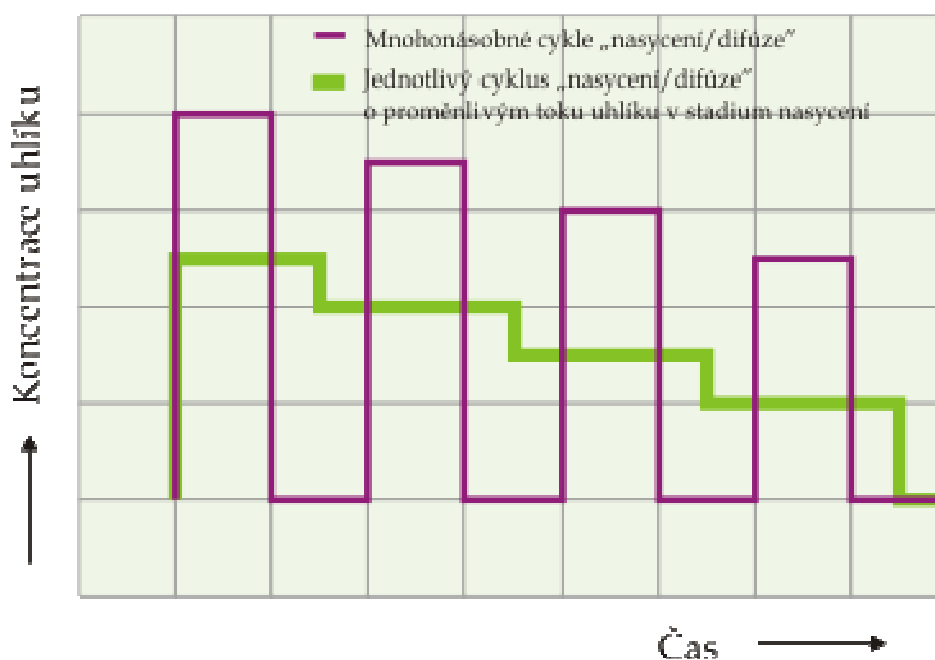
Vakuové cementování je procesem difúzního nasycení povrchní vrstvy ocele uhlíkem. Proces se koná v teplotě $850 \div 1050^{\circ}\text{C}$ a je složen z nasycení a vakuového ohřívání. Během nasycení pod sníženým tlakem do procesní komory se vtlačuje nahličující atmosféru (nejčistěji směs propanu, acetylenu, etylenu dodatečně rozředěný vodíkem nebo dusíkem). Po procesu nasycení se povrchní vrstvy charakterizují vysokou koncentrací uhlíku v přípovrchové vrstvě. Proto se provozuje proces vakuového ohřívání, aby přepravil hmotnost uhlíku do hloubky povrchní vrstvy, co zvětšuje tloušťku vrstvy a zároveň se snižuje koncentrace uhlíku u břehu vrstvy. Předpokládá se, že proces nasycení je výsledkem katalytického působení cementační atmosféry s povrchem obrobku, díky čemu následuje uvolňování se uhlíku v atomové podobě, adsorbování ho přes povrch a difúzní transport do hloubky látky [1][6][7][8][9]. Jednou s hlavních výhod procesu vakuového cementování vůči konvenčním metodám je zkrácení doby procesu.



Obr.3. Schéma jednokomorového pece k vakuovému cementování
přizpůsobeného kalení v dusíku při tlaku do 20bar [1]

- **Ionizační cementování**

Ionizační cementování se koná v podmínkách impulzního doutnavého výboje, ve směsích propanu nebo metanu s přídavkem dusíku, argonu nebo vodíku. Proces se koná při pracovním tlaku atmosféry $10^{-2} \div 10$ hPa a pulsujícím napětí $300 \div 1000$ V. Ionizační cementování, stejně jako vakuové cementování je procesem nerovnovážného, intenzivního nasycení povrchních vrstev uhlíkem. Koná se ve dvou stadiích. V prvním probíhá nasycení uhlíkem povrchní vrstvy, a v druhém se koná difúze uhlíku v hloubku obráběného materiálu. Ionizační cementování se provádí v standardních pecích pro vakuové kalení. Nauhličování vsázky se realizuje konvenční metodou, zatímco chlazení se provádí v plynech při vysokém tlaku 2 MPa (vsázka je katodou a stěny pece jsou anodou). Sám proces je možné realizovat v jednom nebo ve více cyklech o stejném nebo klesajícím toku uhlíku v fázích nasycení (obr. 4) [1][5][13].



Obr.4. Koncentrace uhlíku v povrchní vrstvě po ionizační cementování [5]



2.1.2. Nitridování

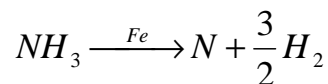
Nitridování patří mezi nejpobulárnější a nejznámější technologie používané v průmyslu. Tento fakt vyplývá z možností, jake můžeme získat z používání tohoto chemicko-tepelného zpracování. Díky této modifikaci povrchu můžeme získat velice cenné exploatační vlastnosti povrchních vrstev, např.: vysokou tvrdost (ocel pro nitridování: 41CrAlMo7-10 kolem 900÷1200HV, pro vysokolegovanou nástrojovou ocel dokonce až do 1500HV), žárupevnost dokonce až do teploty kolem 600÷650°C, vysoká odolnost proti únavě, vysoká odolnost proti otěru a adhezní opotřebení o charakteru stykové únavy a dobrá odolnost proti korozi [5].

Proces nitridování se opírá o nasycení povrchu materiálu dusíkem a ohřívání určitou dobu v prostředí obsahujícím svobodné atomy dusíku. Teplota procesu 500÷600°C dovoluje zpevnění povrchní vrstvy po tepelným zušlechťování bez změny vlastností jádra. Nitridování může být: krátkodobé (od několika minut až do několika hodin) a dlouhodobé (několik desítek hodin).

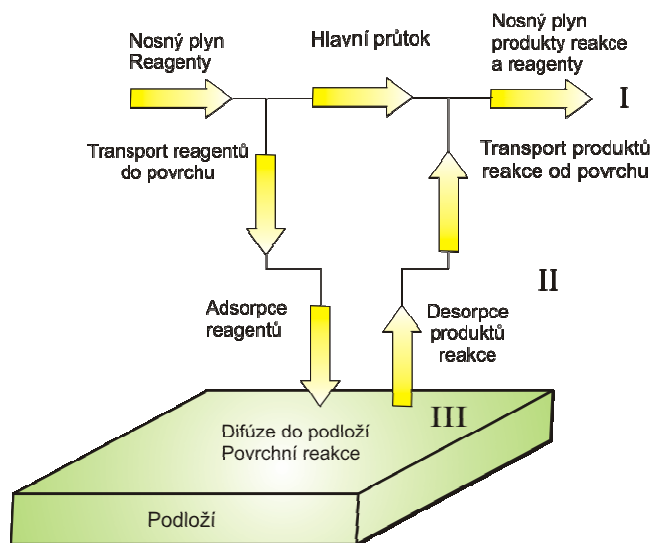
Nitridování se používá pro části z uhlíkových ocelí a legovaných konstrukčních a nástrojových ocelí, které jsou vystavené na opotřebení, a taky pro části vystavené korozi ve vlhkých podmínkách a pro obráběcí nástroje. Nejrozsáhlejší použití nitridování našlo v automobilovém, lod'ařstvím a leteckým průmyslu pro části motorů a čerpadel např. pro: klikové hřídele, ojnice, pouzdra (cylindrického tvaru) , ozubené kola, hřídele, písty atd. Nitridování má taky použití v nástrojích: kovací zápustky, průvhlaky, plastové formy, částí vstřikovacích strojů a řezné nástroje jako frézy, čelistníky, vrtáky a nástroje pro obrábění ozubených kol. Mezi metody nitridování patří: plynové nitridování, vakuové nitridování, ionizační nitridování a nitridování laserem [2][5].

- **Plynové nitridování**

Plynové nitridování se koná v podmínkách dynamického průtoku amoniaku (nebo směsi plynů obsahujících amoniak) v teplotě 500÷600°C:



Během průtoku amoniaku retortou znatelná část atomů získaných na povrchu obrobku výsledkem této reakce podléhá rekombinací do dvouatomových molekul, vrátí se do atmosféry a potom opouští retortu spolu s jinými odpadními plyny. Zbytek z nich zůstává absorbovaný přes ocelové podloží obrobku [1]. V procesu plynového nitridování participují tři oblasti vystupování fyzikálně-chemických jevů, které vedou k vzniku nitridované vrstvy. Jejich schematický vývoj představuje obrázek 5 [10].



Obr.5. Průběh fyzikálně-chemických jevů v nitridační atmosféře [16]

Oblast (I) určuje vrstva plynu, kde probíhá transport plynových složek směrem rovnoběžným s nitridovanou vrstvou.

Oblast (II) určuje vrstva plynu, kde hlavní roli odehrává transport plynových složek směrem kolmým k nitridované vrstvě.

Oblast (III) určuje povrch obrobku, na kterém probíhají chemické reakce a fyzické procesy vedoucí k vzniku nitridované vrstvy a rozhodující o její struktuře, fázovém a chemickém složení.

V moderních technologických přístrojích máme možnost stálé regulace potenciálu dusíku, díky čemuž můžeme získat nitridovanou vrstvu o určené mikrostruktuře. Proces NITREG® na rozdíl od standardních procesů plynového nitridování umožňuje řízení parametrů tvrdosti, tloušťky difúzní zóny nebo zóny vyloučení a je provozován např. v vysoce pokročilých pecích produkce NITREX METAL Co. (obr.6)[10][11].



Obr.6. Příkladové stanoviště firmy Nitrex k plynovému nitridování [12]

- **Vakuové nitridování**

Vrstvy po takém procesu charakterizuje vysoká odolnost proti opotřebení, vysoká tvrdost a zároveň dobrá houževnatost vrstvy [1][5][13].

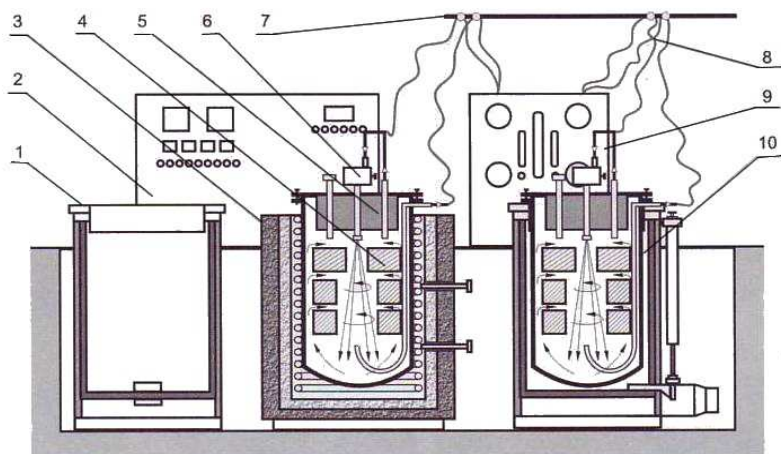
Vakuové nitridování umožňuje neomezené formování chemického složení a strukturální nitridované povrchní struktury. Zejména atraktivní technologii vakuového nitridování je Nitrovac zpracovaná Z. Hasia a jeho spolupracovníky [1].

Technologie NITROVAC je složená z dvou etap [1]:

ETAPA I: krátkodobé chemické nebo tepelno-chemické aktivování povrchu (plynová sulfonitridace) aby zničil povrchní pasivní oxidovou vrstevku.

ETAPA II: nitridování při sníženém tlaku amoniaku, následkem čeho rostou vrstvy o regulované koncentraci dusíku.

Proces vakuového nitridování NITROVAC se provozuje v retortových pecích.



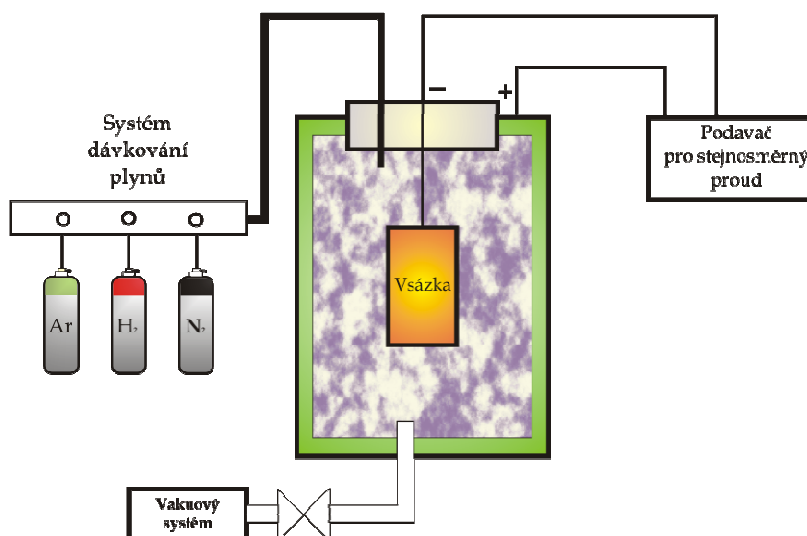
Obr.7. Schéma konstrukce dvouretortového přístroje k technologii NITROVAC [5] 1 – chladivá studánka, 2 - elektrická řídicí skříň, 3 – výhřevné těleso, 4 – vsázka, 5 – víko retorty, 6 – dávkovač páry síru, 7 – zavěšení napájecího vedení, 8 - napájecí vedení, 9 – plynová řídicí skříň, 10 – retorta.

- **Ionizační nitridování**

Ionizační nitridování má použití v strojírenství, automobilovém a leteckém průmyslu, např. do: klikových hřídelů, motorů, silně zatěžovaných ozubených kol, střižníků a matrice pro zpracování tlakem zatepla a zastudena, kokil a vstřikovacích forem. Technologie ionizačního nitridování je realizovaná pomocí doutnavého výboje při tlaku atmosféry obrábění od 100 až 1300Pa, proto se jí taky nazývá metodou plazmovou.

Během doutnavého výboje nosičem proudu jsou elektrony a kladné ióny (+). Pro zahájení procesu ionizačního nitridování je nutný dusík v atomové podobě. Dusík v atomové podobě získáváme s pomocí ionizace plynu (dusíku nebo směsu dusíku s vodíkem), v rozředěném prostoru mezi nitridovanými předměty (katoda) a retortou (anoda). Ionizace plynu je působená doutnavým výbojem. Takhle vyprodukované iony a vysokoenergetické částičky „bombardují“ povrch vsázky. Dost velká energie ionů (30÷50eV) během srážky s povrchem vsázky působí nahřívání povrchní

vrstvy obrobku na teplotu nitridování. Proto, není potřebný vnější zdroj tepla, odtud vznikla metoda „studených stěn komory“ [5].



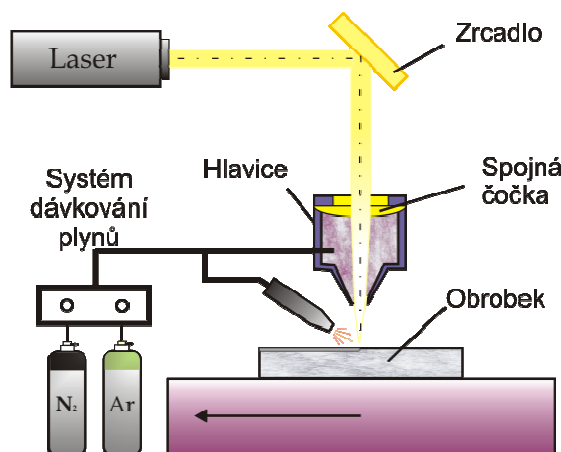
Obr.8. Schéma pece pro ionizační nitridování metodou „studených stěn komory“ [5]

Mezi nejdůležitější výhody metody ionizačního nitridování patří:

- používání při produkování plazmy směsí plynů – dusíku, vodíku a argonu místo obtížného amoniaku (plynové nitridování), co vylučuje nutnost zužitkování odpadních plynů po procesu,
- intenzívné, chemické a fyzické aktivování doutnavým výbojem povrchu obrobku (vsázky), umožňující účinné a opakovatelné vedení procesů nitridování standardních typů ocele a taky rozšíření oblasti použití na těžce nitridačních ocelích (ocele odolné proti korozi a kyselinovzdorné ocele) a slitiny titanu a hliníku,
- šetrnost energie,
- možnost obrábění předmětů o komplikovaných tvarech (dlouhých, asymetrických, s hlubokými otvory),
- libovolné formování mikrostruktury dusíkových vrstev díky správné proporcí plynů, tlaku v pracovní komoře a parametrům proudu a napětí doutnavého výboje,
- možnost využití v posledním stádium procesu jevu katodového rozprašování povrchu aby odstranit stopy nitridů,
- skracení doby procesu nitridování vzhledem k rychlejšímu ohřevání vsázky.

- **Nitridace laserem**

Nitridace laserem je typem chemicko-tepelného zpracování, ve kterém se používá impulsní lasery středního nebo vysokého výkonu, kde aktivním prostředím může být Ar, CO₂, Kr, Xe nebo Xe-Cl. Přítom jejích maximální výkon činí 100MW pro jeden impuls. Doba trvání takového impulsu je 10÷100ns, a její frekvence dosahuje 1 kHz (nejčastěji používanou frekvencí je 100Hz). Kdysi provozováno laserové nitridování v vakuových komorách při tlaku 10⁻⁴Pa, dnes je možné používání této metody při atmosferickém tlaku. Proud plynu např. Ar + N₂ se podává s rychlostí 100m/s, co zabezpečuje před vlivem znečištění ze vzduchu (kyslík, vodík) do pásma nitridování. Termodynamické podmínky způsobí disociaci dusíku, který uléha ionizaci a je implantován v materiál podloží [5].



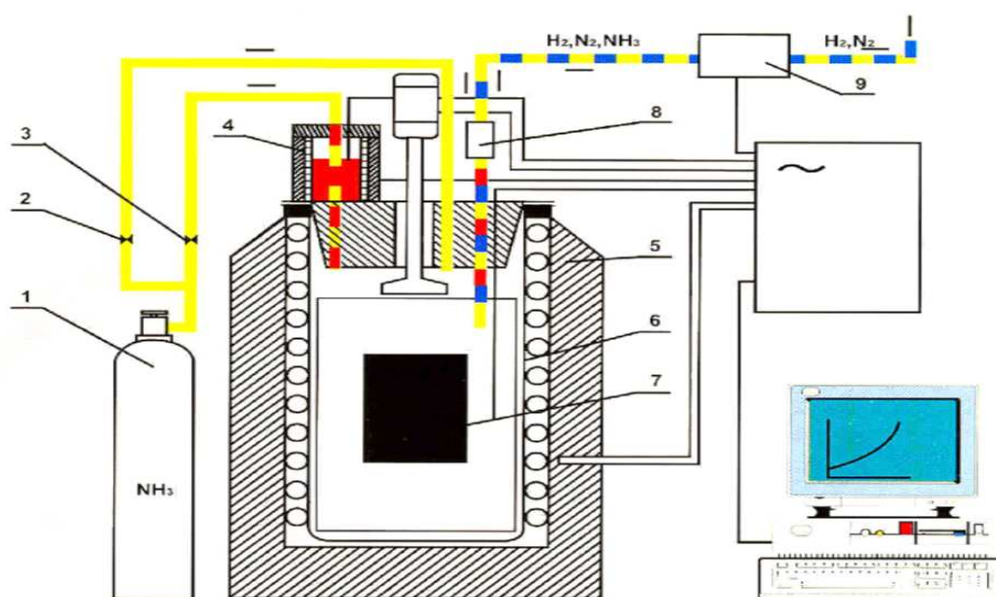
Obr.9. Schéma přístroje k nitridování laserového[5]

Nitridace laserem má spousta výhod díky kterým má stále širší použití v průmyslu. Mezi výhody tohoto chemicko-tepelného zpracování patří především:

- možnost nitridování jak slitin železa, tak i neželezných kovů (Al, Ti)
- nitridování velkorozměrových výrobků
- vytváření vrstev o podobných vlastnostech jako při ionizačním nitridování
- velká rychlost tvoření nitridované vrstvy
- získávání vrstev bez pórovitého zóny nitridů a díky homogenizaci laserového svazku
- možnost nitridování při atmosferickém tlaku s použitím ochranného plynu.

2.1.3. Sulfonitridování v plynném prostředí

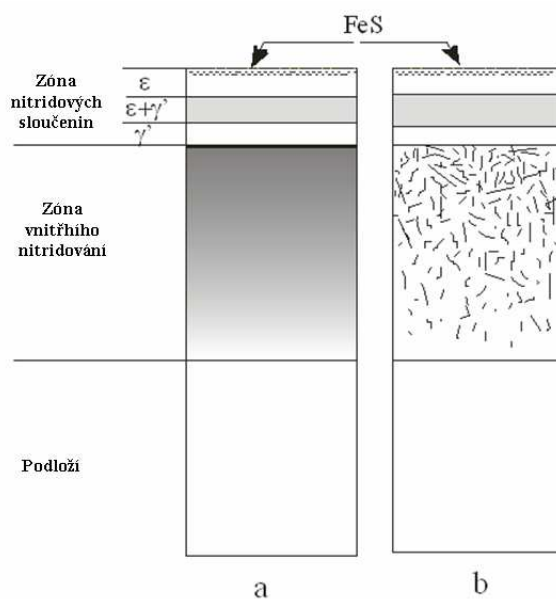
Sulfonitridování v plynném prostředí se realizuje ve směsí částečně disociovaného amoniaku a pár síry. Technologie sulfonitridace se opírá na umístění obrobku v peci a ohřání ho v dusíku na teplotu 350° C, pak během dodávání amoniaku, obrobek se ohřevá na teplotu procesu 520÷600°C. Po dosahnutí teploty procesu, dodava se do pece páry síry. Amoniak se podává do retory dvěma cestami: jedna vede přímo k retortě, zatím druhá vede přes nádobu se sírou ohřanou nad teplotu vření a protékající nádobím amoniak nese páry síry do retorty (obr. 10). Doba procesu trvá od 6 do 30 hodin a záleží na typu ocele a tloušťce sulfonitridované vrstvy. Delší činnosti je chlazení v přítomnosti amoniaku a síry na teplotu 400°C a později chlazení v dusíku na teplotu 50°C [14][15][16]. Součásti pro sulfonitridace se vyrábí na hotovo, co vylučuje konečnou operaci broušení. Před procesem se očišťuje součásti z znečištění. Základní součásti pece pro sulfonitridování v plynném prostředí představuje obrázek 10.



Obr.10. Schéma stanoviště pro sulfonitridování v plynném prostředí [15]

- 1-nádrž s amoniakem, 2-regulátor průtoku amoniaku přímo do retorty,
- 3- regulátor průtoku amoniaku dávkovačem síry, 4- dávkovač síry, 5- ohřívací
- nístěj, 6-retorta, 7-vsázka, 8- záchyt pár síry z „vycházející“ atmosféry,
- 9- systém kontroly složení atmosféry.

V případě nelegovaných ocelí (uhlíkových), litin a vysokolegovaných ocelí se vyskytuje tzv. bílá zóna složená z nitridů ϵ s siričky železa FeS, směs nitridů $\epsilon+\gamma'$, a nitridů γ' . Zatím zóna vnitřního nitridování pro nízkouhlíkové, nelegované ocele, šedé litiny je složená z oblasti vyloučení nitridů typu γ' , pro legované ocele je to zóna s koherentními vyloučením nitridů legujících prvků, zvaná taky difúznou zónou (obr. 11). Tloušťka sulfonitridované vrstvy činí nejčastěji 0,2÷0,3mm, tlusté povlaky dokonce až do 0,5mm.



Obr.11. Schéma sulfonitridované vrstvy

a) na legované oceli b) na uhlíkové oceli [15]

Pro uhlíkové ocele a šedivé litiny můžeme v podstatě získat zvýšenou tvrdost technologické vrchní vrstvy omezené na zóny nitridových sloučenin ϵ , $\epsilon + \gamma'$, γ' (varianta b) a nepřekračuje 700HV. Proto TWW je možné používat pro uhlíkové ocele a šedivé litiny v třecích uzlech zatížených nízkými a středními tlaky povrchního charakteru. Zatím vrstvy na legovaných ocelech charakterizuje ještě vyšší tvrdost (do 1300HV) zóny nitridových sloučenin a vysoká tvrdost v zóně vnitřního nitridování (od 500 do 1200HV). Proto TWW je možné používat pro legované ocele v třecích uzlech zatížených vysokými tlaky lineárního a bodového charakteru (šnekové převody, ozubené převody) [14][15].



Výhody procesu sulfonitridování v plynném prostředí:

- umožňuje vytváření sulfonitridovaných vrstev na spousta druhů oceli a litin
- sulfonitridování zvětšuje životnost a spolehlivost součástí strojů vyrobených z ocelí a litin a zmenšuje koeficient tření
- technologická vrchní vrstva se charakterizuje vysokou tvrdostí a odolností proti otěru a taky zvýšenou odolností proti zadíráání
- zvýšená odolnost proti korozi
- vzrůst únavové pevnosti
- nízké náklady na proces a snížení exploatačních nákladů strojů a přístrojů
- proces sulfonitridování v plynném prostředí neznečišťuje prostředí

2.1.4. Karbonitridování

Vysokoteplotní karbonitridace spočívá v současném nasycení vrchních vrstev ocele (vyražených z nízkouhlíkových nebo středněuhlíkových ocelí legovaných nebo nelegovaných), uhlíkem a dusíkem. Tomuto zpracování podléhají taky nerezavějící ocele cílem zvýšení vrchní tvrdosti, odolnosti proti otěru a únavové pevnosti. Tento proces se obvykle provozuje v teplotě $750 \div 900^{\circ}\text{C}$, a potom se provádí tepelné zpracování, které spočívá v kalení a nízkým popouštění cílem získání požadovaných vlastností. Proces vysokoteplotní karbonitridace je sblížený cementování a obvykle je provozován ve stejném plynném prostředí (např. v endotermické atmosféře) častěji s přidávkou $1 \div 8\% \text{NH}_3$ a propanu $1 \div 4\%$ nebo zemního plynu [2][17].

Na konečný výsledek vysokoteplotní karbonitridace mají vliv takové parametry procesu, jako: teplota, čas, uhlíkový potenciál a nitridační potenciál atmosféry a intenzita průtoku atmosféry. Doba karbonitridace potřebná pro získání správné tloušťky vrstvy záleží na teplotě procesu, uhlíkovým potenciálem a dusíkovým potenciálem atmosféry a druhu zpracované ocele.

Nízkoteplotní plynové karbonitridace se používá hlavně pro konstrukční středněuhlíkové legované ocele, nástrojové a rychlořezné ocele a taky pro nerezavějící vysokochromové ocele a austenitické chromově-niklidové ocele k zvýšení tvrdosti, odolnosti proti otěru a únavové pevnosti.

Předměty pro nízkoteplotní karbonitridace se obvykle zušlechťuje, přitom teplota popouštění by měla být minimum 30°C vyšší než teplota samé karbonitridace. Proces nízkoteplotní karbonitridace se nejčastěji provozuje v teplotě 560÷580°C po dobu 0,5÷5h, v atmosféře vytvořené z amoniaku a cementačního plynu nebo tekutých uhlovodíků.

Karbonitridační atmosferu mohou tvořit směsí obsahující 50% amoniaku a 50% metanu, 50% amoniaku a 50% endotermického plynu nebo 33% amoniaku a 67% endotermického plynu [2][17]. Během procesu se konají reakce:



a disociace NH_3 , které umožňují další adsorpci a difuzi atomů uhlíku a dusíku do hloubky ocele. Tloušťka vrstev získaných touto metodou má 0,01÷0,02mm.

Nízkoteplotní karbonitridace má použití v zpěvnění vačkových hřídelů, klikových hřídelů, brzdových bubnů, ozubených kol, součástí hydraulických a přesných mechanismů ve Spojených státech, Německu a Japonsku.



Obr. 12. Komorový pec pro karbonitridování, vyrobený firmou Sealed Quench [18]



2.1.5 Boridování oceli

Boridování spočívá v difúzním nasycování povrchové vrstvy oceli borem v teplotě $900\div 1000^{\circ}\text{C}$ v čase pár až několika hodin. Proces boridování se realizuje různými metodami, počínaje jednoduchou, dílenskou kontaktní metodou v plynu podobající se cementování v prášku, přes pasty pro lokální obrábění, metody lázní (bezproudá a koupací), plynové metody a na závěr moderní a velmi vzácnou metodou boridování doutnavým výbojem [1].

Dominantními metodami boridování jsou tyto jednoduché a netoxické dílenské metody: prášková a s použitím past. Prášková směs jak rovněž pasta se skládají ze tří složek – látek obsahujících bor (karbidu boru, boridu železa nebo amorfního boru), chemického aktivátora, který dopravuje atomy boru z látky obsahující bor do povrchu obrobku (NH_4Cl nebo KBF_4) a také z inertních výplňových látek (sazí, oxidu hliníku). Ke stejně levným a jednoduchým metodám patří metoda lázní, která se provádí v roztoku roztaveného boraxu - $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ – aktivního elektrochemicky (elektrolytická metoda) nebo v chemicky aktivované 30÷40% přísadě látky obsahující bor v podobě karbidu boru nebo boridu železa (bezproudá lázeň). Naopak iontová a plynová metoda se vyznačují vysokou čistotou obráběné vsázky, avšak vzhledem k vysoké toxicitě a výbušnosti používaných směsí sloučenin a chemických prvků ($\text{BCl}_3 + \text{H}_2$ nebo $\text{B}_2\text{H}_6 + \text{H}_2$), které ohrožují obsluhu a životní prostředí, nenalezly širší použití.

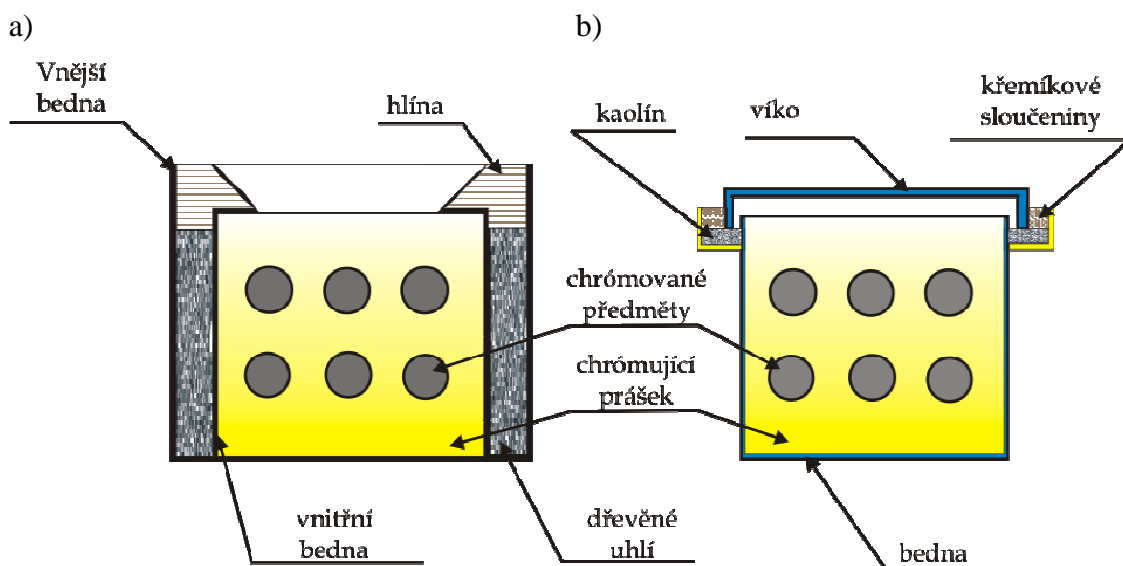
Předností boridovaných vrstev je především vytvoření velmi tvrdé vrstvy (s tvrdostí dokonce 2300HV) s dosti značnou tloušťkou (do 0,3mm). Boridované vrstvy se charakterizují vysokou trvanlivostí díky vysoké odolnosti proti třecímu a eroznímu opotřebení. Proces difúzního boridování našel široké použití v hornických zařízeních, částech náhonu pásových vozidel, pracovních součástech silničních strojů, specializovaných nástrojích, součástech uhelných mlýnů, slévárenském vybavení atd. Avšak metoda boridování začíná být vytlačována moderními technologiemi vytváření supertvrdých keramických povrchů metodami CVD a PVD (kapitola 2.1.7.), které jsou energeticky úsporné, velmi precizní, bezpečné v obsluze a přívětivé životnímu prostředí [1].

2.1.6. Difúzní pokovování

Difúzní pokovování (chromování, titanování, vanadování a difúzní hliníkování a zároveň složité procesy) spočívá v difúzním nasycování povrchových vrstev oceli metalickými prvky v poměrně vysoké teplotě řady $850\div 1100^{\circ}\text{C}$. Přírůstek povrchových metalizovaných vrstev závisí na difúzní rychlosti kovů neboli prvků s relativně velkými atomovými průměry. Tloušťka vrstev po difúzním pokovování dosahuje cca $0,01\div 0,3\text{ mm}$.

Procesy difúzního pokovování mohou být prováděny plynovou nebo práškovou metodou (kontaktní práškovou), kde vytváření halogenidů probíhá ve speciálních rámech v přítomnosti aktivátora procesu (halogenidy amonné). S ohledem na vysokou toxicitu halogenidů kovů, jejich vysoké náklady a také problematickou trvanlivost retorty, plynová metoda nenalezla širšího využití v průmyslu.

Prášková metoda spočívá v umístění částí určených k pokovování ve speciálních žáruvzdorných rámech s aktivní směsí. Složení směsi obsahuje: zdroj sytícího kovu (v práškové formě), aktivátor a také výplňovou keramickou látku (práškovanou). Takové rámy by měly vzhledem k vysoké toxicitě halogenidů kovu zajistit celkovou hermetičnost vnitřního prostoru (obr. 13)



Obr.13. Dva typy konstrukčního řešení hermetických beden pro difúzní pokovování [1]

- a) dvojnásobně utěsněná aktivním uhlíkem bedna
- b) bedna s labyrintovým těsněním



Díky tomuto zpracování máme možnost vytvořit jednoduchým a levným způsobem velmi tvrdé vrstvy s vysokou odolností proti eroznímu opotřebení a opotřebení otěrem a také charakteristické vysokou odolností vůči plynové korozi ve vysokých teplotách.

Tab.1. Vlastnosti a použití difúzně pokovovaných vrstev [1]

Typ vrstvy	Tloušťka [mm]	Struktura	Tvrdost [HV0,1]	Odolnost proti korozi	Použití
Difúzně chrómovaná na nástrojových ocelích	0,01 ÷ 0,04	(Cr,Fe) ₂₃ C ₆ (Cr,Fe) ₇ C ₃	min.1400	Odolnost proti oxidaci do 850°C, atmosferické korozi a korozi v mořské vodě	Řezné nástroje pro tváření, kokile, trysky, turbínová lopátka
Difúzně titanovaná na nástrojových ocelích	do 0,02	TiC, FeTi Fe ₂ Ti	3500 ÷ 4000	Odolnost proti oxidaci do 450°C	Řezy, měřicí přístroje, lisovací formy pro prášky
Difúzně vanadovaná na nástrojových ocelích	0,01 ÷ 0,02	VC	3600	Brak odolnosti	Raznice, řezy, lisovací formy pro prášky, měřicí přístroje
		V ₄ C ₃	2300		
Difúzně hliníková na nízko-uhlíkových ocelích	0,05 ÷ 0,3	FeAl ₂ FeAl ₃ Fe ₂ Al ₅ roztok Al v feritu		Odolnost proti plynové (oxidové a sírové) korozi do 800°C	Součásti výfukových systémů motorů a spalovacích komor
Difúzně chrómoaluminiovaná na ocelích a žáruodolných slitinách	do 0,3	Stálý roztok Cr a Al v feritu a austenitu	Záleží na typu podloží	Odolnost proti činnostem výfukových plynů do 1200°C	spalovací komory a turbínové lopátky tryskových motorů, součásti zářičových hořáků a trubek v pecích pro tepelné zpracování



2.1.7. Speciální metody komplexního chemicko-tepelného zpracování

Ke speciálním metodám chemicko-tepelného zpracování patří:

- chemické depozice z plynové fáze CVD
- fyzikální depozice z plynové fáze PVD

Metoda CVD (chemical vapour deposition) spočívá ve vytvoření vrstev karbidů a nitridů kovů, např.: vanadu, tantalu, chrómu, titanu nebo zirkonu z plynových složek atmosféry na povrchu obrobku. Přičemž složky atmosféry mohou být aktivovány tepelně a také plazmou. Proces je veden v plynové atmosféře obsahující páry sloučenin, ze které bude vytvářena vrstva (karbidová, nitridová, boridová, oxidová) v atmosférickém tlaku a teplotě ($900\div 1100^{\circ}\text{C}$). Atmosféry jsou nejčastěji složeny z halogenidu difundujícího prvku a také uhlovodíku, dusíku, vodíku nebo netečného plynu (argonu). Vlivem chemické reakce, která probíhá na povrchu obrobku, se vylučují atomy (chrómu, boru, titanu, tantalu nebo hliníku) ze sloučeniny (např.: CrCl_2 , BCl_3 , TiCl_4 , TaCl_4 , Al_2Cl_3). Naopak druhá složka vrstvy pochází z podloží (z karbidové vrstvy) nebo z atmosféry (nitridové nebo oxidové vrstvy). Vrstvy vytvářené touto metodou se vyznačují vysokou tvrdostí, odolností proti třecímu opotřebení a taky korozi. Tyto povlaky našly široké použití v povlékání řezných nástrojů a také nástrojů určených pro zpracování tlakem za tepla nebo za studena [1][2].

Metoda PVD (physical vapour deposition) spočívá v depozici vrstev z plynové fáze pomocí fyzikálních reakcí. Metoda PVD využívá fyzikálních jevů takových jako odpařování kovů nebo slitin, anebo katodové rozprašování ve vakuu a ionizaci plynů a kovových výparů s využitím různých procesů. Proces spočívá v umístění předmětu ve speciálním zařízení na studeném nebo předehřátém podloží na teplotu $200\div 500^{\circ}\text{C}$. Tato metoda umožňuje získání velmi tenkých vrstev dobře adhezivně spojených s podložím. Povlaky vytvářené touto metodou se vyznačují dobrou přilnavostí k podloží a také metalickým leskem. Splnění podmínek dobré adheze vyžaduje velmi důkladnou přípravu (očištění) povrchu, protože teplota depozice povlaku není příliš vysoká. Základním nedostatkem procesů PVD jsou jejich vysoké náklady spojené s koupí a nainstalováním technologických zařízení a také dosti vysoké náklady na odbornou technickou obsluhu nezbytnou během realizace procesů [1][2].



2.2. Tribologické zkoušky jako informační zdroj

Tribologické zkoušky můžeme rozčlenit na teoretické a ověřovací. Teoretické zkoušky spočívají v analýze tribologických procesů s použitím matematických modelů. Nicméně teoretické zkoušky nedokáží rozeznat tribologické procesy tření a opotřebení. A proto se provádějí ověřovací zkoušky, které v tribologii dominují. Právě ony jsou totiž zdrojem nových informací o tribologických procesech a materiálech [19].

V bodě 2.2.1. byly charakterizovány ověřovací zkoušky, zatímco v bodě 2.2.2. byly představeny metody a testovací zařízení ke zkouškám tření a opotřebení.

2.2.1. Klasifikace a charakteristika tribologických zkoušek

Vzhledem k umístění můžeme zkoušky rozčlenit na laboratorní zkoušky statické (prováděné na vývojových pracovištích v závodech) a dynamické (prováděné za pohybu na konkrétních objektech).

K ověřovacím zkouškám můžeme zařadit:

- základní
- aplikované
- provozní

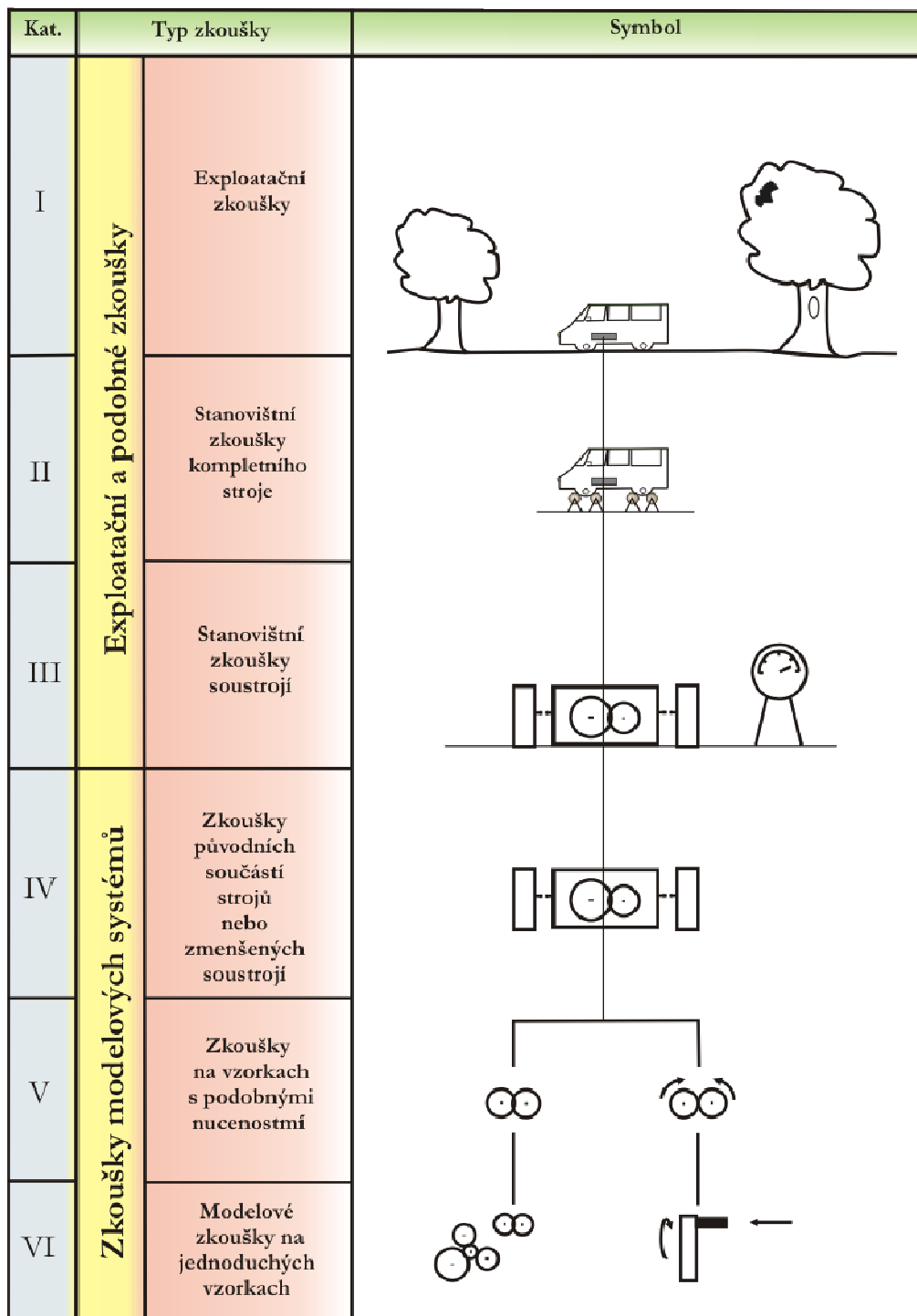
Základní zkoušky jsou hlavním zdrojem informací o tribologických procesech. Základním cílem tribologických zkoušek je zkoumání jevů probíhajících během tření, které rozhodují o jeho charakteru a průběhu a v důsledku o základních následcích, kterými jsou třecí odpory a opotřebení. Na charakter a průběh procesu mají vliv faktory různého typu, ke kterým patří mj. pohybové podmínky (zatížení, teplota, rychlost a druh okolí), druh spoje, druh třecích materiálů, stav jejich povrchových vrstev a také druh mazacího prostředku. Největší předností těchto zkoušek je možnost jejich provádění na malých předmětech v poměrně krátkém čase [19].



Cílem *aplikovaných zkoušek* je určení důležitosti vlivu součinitelů materiálů na tribologické procesy. Slouží k určování přirozených vlastností součástí tribologických systémů, ke kterým patří například kluzné nebo třecí vlastnosti materiálů a mazivost mazacích prostředků. Výsledky těchto zkoušek tvoří základ klasifikace tribologických materiálů a dovolují určit jejich použitelnost k určenému účelu. Takový test může být prováděn na materiálových vzorcích nebo na konkrétním modelu. Samozřejmě v prvním případě zkouška je méně nákladná a máme možnost provedení pokusu na jednoduchém zařízení, avšak výsledky těchto zkoušek mají srovnávací charakter a spíše se nehodí pro přímé převedení na různé strojové dílce. Modelové zkoušky jsou více nákladné a trvají déle, ale mají tu přednost, že jejich výsledky mohou být přímo převedeny na strojové dílce podobné zkoušenému modelu a pracují v podmínkách podobných existujícím podmínkám během modelových zkoušek.

Když máme do činění s hotovými předměty, které uvádíme do pohybu, tak mluvíme o *provozních zkouškách*. Předností těchto zkoušek je to, že výsledky jsou přímo užitečné a na jejich základě můžeme určit výkonnost zařízení, jeho životnost a spolehlivost, a dokonce i můžeme posoudit hodnotu parametrů obsluhy, např. přimazávání třecích uzlů. Nedostatkem této metody jsou vysoké finanční náklady, které vyplývají z množství a hodnoty zkoušených předmětů. Proto se testy provádějí za dvěma účely: buď jako zkoušky testující nový stroj nebo jeho soustrojí, nebo jako zkoušky za účelem zdokonalení strojů [19].

Na obrázku byla představena klasifikace experimentálních tribologických zkoušek podle Heinkeho. Níže uvedená klasifikace vytváří postupnou redukci tribologického systému podle normy DIN 50322. Opírá se o návrh Heinkeho, který experimenty opotřebení rozdělil do jednotlivých kategorií a určil jejich seřazení jako tribologickou testovací posloupnost [20].



Obr.14. Klasifikace ověřovacích tribologických zkoušek podle Heinkeho [20]



2.2.2. Testovací metody a zařízení ke zkouškám tření a opotřebení

Ve skutečnosti je většina informací o procesech tření získávána díky experimentálním zkouškám. Zkoušky tření a opotřebení jsou prováděny pomocí zkušebních strojů různého typu. Existuje mnoho typů zařízení, která byla navržena dle odlišných kritérií a pravidel. Tato zařízení umožňují zkoušení tření a opotřebení různými metodami, a vyskytují se spíše jednotlivě, vzácněji sériově. Výsledky získané tímto způsobem se vyznačují malou opakovatelností a prakticky je není možné srovnávat.

Na základě mnoha analýz a komplexní zprávy o stavu tribologie a tribotechniky v Polsku byly stanoveny hlavní potřeby v oblasti tribologických zkoušek. Díky těmto pracím byl vytvořena sbírka různých výzkumných metod a různorodých zařízení, která umožňují vyhodnotit tribologické vlastnosti materiálů [20][21][23]. Na území Polska vedoucím výrobcem tribologických zařízení je Institut technologie provozu v Radomi, od roku 2004 Státní výzkumný ústav (polsky: Instytut Technologii Eksploatacji, Państwowy Instytut Badawczy zkratka: ITeE-PIB)[22].

Během testovacích zkoušek tribologických vlastností třecích materiálů uzlů jsou určovány následující veličiny [20]:

- koeficient tření (je zkoušena síla nebo třecí moment)
- mechanické vibrace a emise zvuků
- teplota
- opotřebení

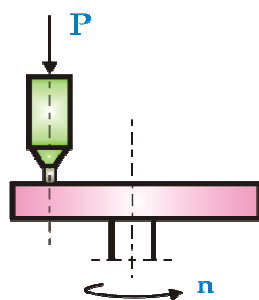
Během testů se rozlišují tři základní druhy opotřebení [20]:

- opotřebení okamžité a narůstající lavinovitě (zadírání)
- stálé opotřebení (např. opotřebení otěrem)
- opotřebení vznikající po určité době jako výsledek akumulace potenciální energie (pittingu)

V další části budou představena typická výzkumná zařízení, která slouží ke zkouškám tření a opotřebení konstrukčních materiálů, povrchových vrstev odolných proti opotřebení a vlastností mazacích prostředků.

- **Zařízení ve spojení váleček - kotouč (Pin on disk)**

Zařízení ve spojení váleček - kotouč je nejpobulárnějším výzkumným zařízením pro hodnocení tribologických vlastností materiálů používaných na kluzné součásti strojů. Pomocí tohoto zařízení se určuje odolnost proti opotřebení a koeficient tření materiálu během skluzu po jiném materiálu v závislosti na: rychlosti skluzu, povrchovém tlaku, přítomnosti a typu mazacího prostředku, a také na znečištění a jiných faktorech. Toto zařízení slouží k hodnocení trvanlivosti a vlastností povlaků usazovaných na vysoce zatížených součástech strojů, ke zkouškám konstrukčních materiálů a také ke zkouškám třecích procesů mazaného spoje[20]. Na obrázku 15 bylo představeno schéma metody váleček - kotouč (kulička - kotouč). Zkušební spojení se skládá z nepohyblivého válečku (nebo kuličky) vlačovaného silou P do obracejícího se se zadanou rychlostí n kotouče. Na obrázku 16 byly představeny typy vnikacích tělísek a vzhled třecího uzlu zařízení typu váleček - kotouč (kulička – kotouč).



Obr.15. Schéma metody váleček - kotouč [22]



Obr.16. Třecí uzel typu:
a) váleček– kotouč b) kulička – kotouč [22]

Příkladové komplexní zkušební pracoviště znázorněné na obrázku 17.



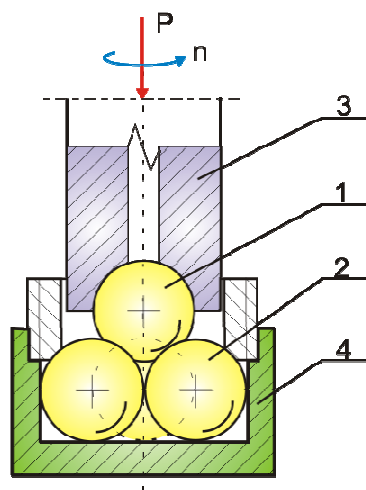
Obr.17. Komplexní zkušební pracoviště ve spojení váleček– kotouč [22]

- Čtyřkuličkový přístroj

Druhým velmi populárním tribologickým zařízením je čtyřkuličkový přístroj. Toto zařízení slouží k vyhodnocení vlastností mazacích olejů a plastických tuků. Jednou z jeho předností je jednoduchá konstrukce, nevelké rozměry, krátký zkušební čas a jednoduché vyhodnocení výsledků zkoušky. Druhou předností jsou poměrně levné součásti vytvářející třecí uzel a nevelké množství mazacího prostředku potřebného pro zkoušky [20]. Zkušební spojení se skládá ze tří nepohyblivých kuliček (2) umístěných v objímce (4), přitlačovaných horní kuličkou (1) se silou P . Horní kulička je upevněná ve vřetenu (3), které se otáčí se zadanou rychlostí n . Níže uvedený obrázek znázorňuje komplexní pracoviště s možností změny zatížení třecího uzlu během zkušebního času:



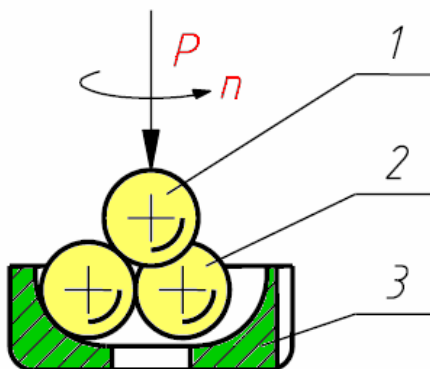
Obr.19. Čtyřkuličkový přístroj s počítačovým řízením T-02 [22]



Obr.18. Třecí uzel ve čtyřkuličkovém přístroji [22] 1- horní kulička, 2 – dolní kuličky, 3 – vřeteno, 4 - objímka

Modifikací výše uvedeného čtyřkuličkového přístroje je zařízení T-03, určené pro zkoušku vlivu mazacích prostředků a také konstrukčních materiálů na povrchové únavové opotřebení (pitting) vysocezatížených součástí v mazaném spoji. Tři dolní kuličky umístěné ve valivé dráze se otáčejí v mazacím médiu, až do momentu únavového opotřebení horní kuličky umístěné ve vřetenu.

Měřítkem opotřebení v těchto zkušebních procesech je celkový pracovní čas třecího uzlu do objevení se pittingu na horní kuličce. Níže uvedený obrázek 20 znázorňuje schéma třecího uzlu čtyřkuličkového přístroje T-03 [20].



Obr 20. Třecí uzel čtyřkuličkového přístroje [22]

1 – horní kulička, 2 – dolní kuličky, 3 – valivá dráha

- **Zařízení tři válečky – kužel**

Toto zařízení slouží ke zkoušce odolnosti proti opotřebení a také odolnosti proti zadření během kluzného tření. Zkušební spojení se skládá ze 3 válečků zhotovených ze zkušebního materiálu, rozmístěných po 120° , které jsou přitlačovány silou P k otáčejícímu se protivzorku s rychlostí n .



Obr.21. Třecí uzel typu tři válečky – kužel [22]

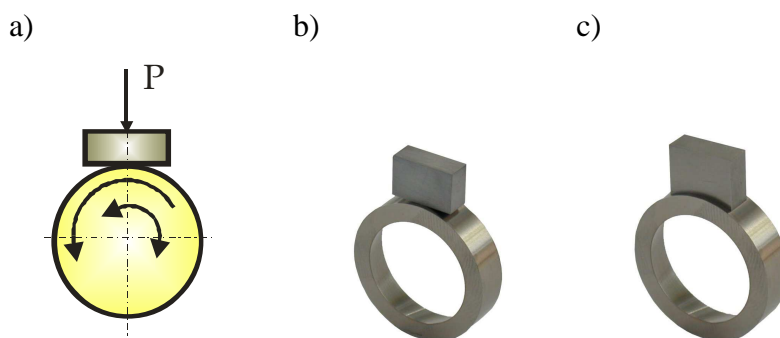


Rys.22. Pracoviště se spojením 3 válečky – kužel T – 04 [22]

- **Zařízení typu kroužek – špalek**

Zařízení přizpůsobené ke zkoušce tribologických vlastností mazacích prostředků, takových jako plastická maziva, oleje, pevná maziva. Tester je přizpůsobený ke zkoušce odolnosti proti opotřebení materiálů používaných na kluzné součásti strojů. Pomocí tohoto přístroje můžeme také provést zkoušku odolnosti proti zadírávání nízkotřecích povlaků nanesených na povrchy vysocezatížených součástí strojů [20].

Zkušební spojení se skládá z nehybného špalku (zkoušeného materiálu), přitlačovaného silou P na otáčející se kroužek v jednom směru nebo provádějícího oscilační pohyb s příslušnou amplitudou a frekvencí. Třecí spoj může být rozložený nebo koncentrovaný (obr. 23).



Obr.23. Třecí uzel testeru kroužek – špalek [22]:

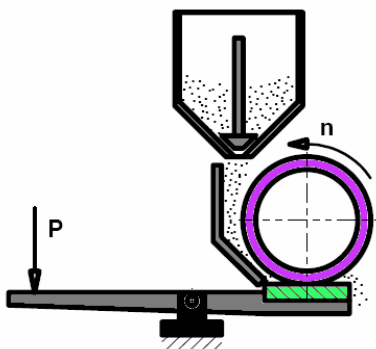
a) zkušební spojení, b) s koncentrovaným spojem, c) s rozloženým spojem



Obr.24. Pracoviště typu kroužek – špalek T – 05 [22]

- **Zařízení pro zkoušku suchým brusivem**

Tester je přizpůsoben ke zkoušce odolnosti proti opotřebení otěrem konstrukčních materiálů. Je používán pro zkoušení odolnosti proti opotřebení kovových povlaků během tření o volné a suché brusivo. Zkušební spojení se skládá z destičky zhotovené ze zkoušeného materiálu a zároveň z kroužku, který je protivzorkem obklopeným gumovým kroužkem obracejícím se se zadanou rychlostí n . Destička (pod kroužkem) je přitlačována s příslušnou silou ke kroužku, zatímco částice brusiva padají do oblasti spoje. Samotná zkouška je prováděna ve stejných pracovních podmínkách. Provede se tření vzorků zhotovených ze zkoušeného a vzorkového materiálu o volné a suché brusivo padající do oblasti spoje, po čemž se provádí měření a porovnání hromadného opotřebení vzorků [22].



Obr.25. Schéma třecího uzlu
kroužek - destička [22]

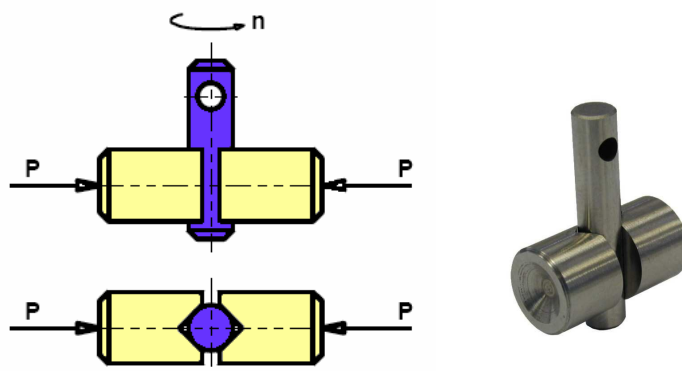


Obr.26. Pracoviště zkoušek otěru
volným a suchým brusivem

- **Přístroj typu váleček-prizma**

Tento přístroj se používá k tribologickým zkouškám mazacích prostředků (olejů, plastických maziv, pevných maziv) a také ke zkouškám odolnosti proti opotřebení materiálů používaných na kluzné součásti strojů. Zkušební spojení se skládá z válečku (protivzorku) otáčeného se stálou obrátovou rychlostí n , který se otáčí kolem vlastní osy a také ze dvou prizmatických špalíků zhotovených ze zkoušeného materiálu, které jsou přitlačovány k válečku se zadanou silou P .

Třecí uzel má možnost práce v podmínkách suchého tření, může být mazán jednorázově např. nanesením jedné dávky plastického nebo stálého maziva a taktéž může být mazán metodou ponorného mazání v oleji umístěném ve speciální nádrži [22].



Obr.27. Třecí uzel typu váleček-prizma [22]

Hlavní předností tohoto zařízení je jednoduchý tvar vzorků, nenáročné požadavky, pokud jde o přesnost zhotovení vzorků a také jednoduchá a rychlá obsluha testeru.

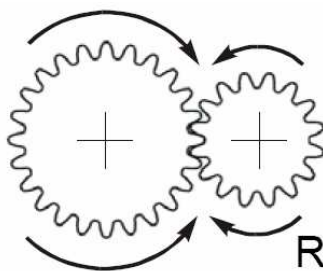


Obr.28. Pracoviště typu váleček-prizma T – 09 [22]

- **Zařízení pro zkoušky vlivu mazacích prostředků na zadírání**

Zařízením ke zkoušení vlastností mazacích olejů (převodových) a plastických maziv proti zadření je Tester T – 12. Toto zařízení slouží k vyhodnocení kvality mazacích, motorových, převodových a strojních, hydraulických olejů a polotekutých maziv. Hlavní jednotkou v tomto přístroji je zkušební převodovka, která se skládá ze dvou ozubených kol (obr. 29.) pracujících v prostředí zkoušeného mazacího prostředku [20].

Zkušební spojení složené ze dvou ozubených kol (cementované, broušené křížovou metodou Maaga) obracejících se zadanou rychlostí a zatížených příslušným momentem. Velké ozubené kolo se obrací v protisměru nebo ve směru pohybu hodinových ručiček a to v závislosti na zkušební metodě. Testovací převodovka je umístěná v komoře, která dovoluje předeřhřátí zkoušeného oleje před chodem [20]. Obrázek 30 znázorňuje příkladové zkušební pracoviště s ozubenými koly v systému kroužící síly.



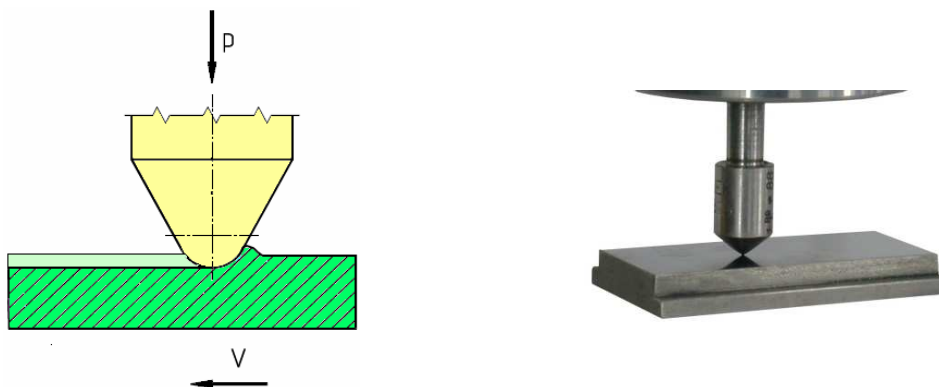
Obr.29. Schéma a vzhled ozubených kol testovací převodovky [20]



Obr.30. Zařízení pro zkoušku vlivu mazacích prostředků na zadírání [22]

- **Tester pro vyhodnocení odolnosti proti poškrábání**

Toto zařízení slouží pro zkoušky odolnosti konstrukčních materiálů a povlaků takových jako např. barvy a laky. Metoda je jednoduchá a časově nenáročná. Podstata měření spočívá v provedení rýhy kulatým zkušebním tělískem (kulička 1mm zhotovená z oceli, karbidu wolframu nebo rubínu). Šířka rýhy se měří pomocí mikroskopu a hloubka pomocí profilometru. Testovací spojení se skládá z nehybného zkušebního tělíska, které je přitlačováno s příslušnou silou k přesouvající se destičce se zadanou rychlostí. Destička je zhotovená ze zkoušeného materiálu, v případě zkoušek povlaků jsou povlaky nanášeny na destičku [22].



Obr.31. Schéma a vzhled testovacího spojení [22]



Obr.32. Pracoviště vyhodnocení odolnosti proti poškrábání T-14 [22]

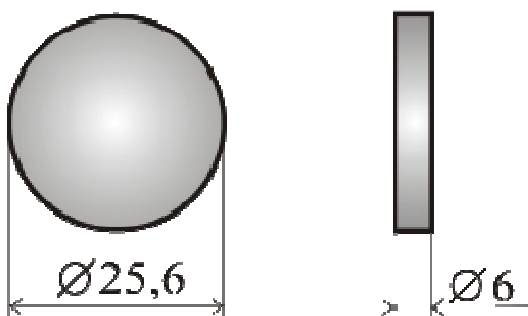
2.3. Metodika zkoušek

2.3.1. Zkušební materiál

Tato práce se zabývala modifikací povrchové vrstvy ocelových vzorků. Vzorky byly zhotoveny z tyče ve tvaru a rozměru znázorněném na obrázku 33.

Příprava povrchu vzorků k procesu chemicko-tepelného zpracování:

- broušení brusným papírem o hrubosti: 180, 320, 600



Obr.33. Tvar a rozměr ocelových vzorků

V provedeném experimentu byly použity ocelové vzorky podle normy PN – EN 10084:2002 a zároveň ČSN – EN 10084 (ČSN 41 4220 „*Ocel 14 220 Mn-Cr*“) [24]. Je to legovaná ocel k cementaci, která našla použití na středně namáhané součásti strojů a zařízení. Konkrétně na ozubená kola, rozvodové válečky, spirály, svorníky. Tato ocel po válcování dosahuje max. tvrdost 238HV (222HB).

Tab.2. Chemické složení v [%] konstrukční oceli k cementaci

C	Mn	Cr	Al	N
0,14÷0,19	1,00÷1,40	0,80÷1,20	0,020÷0,035	min 90ppm

2.3.2. Schéma pracoviště chemicko-tepelného zpracování

- Sulfonitridace v plynu

Proces sulfonitridace v plynu byl poprvé proveden v Bełchatowsko - kleszczowském průmyslově-technologickém parku v peci VVT – 100/200 NSv.(obr.34). Je to pec IV. generace, vybavená automatikou, která umožňuje řízení parametrů technologických procesů, přičemž počítačové ovladače vylučují lidskou chybu a přitom zaručují vysokou kvalitu výrobku a zároveň opakovatelnost procesu. Po procesu se do atmosféry dostává pouze dusík a vodní pára.



Obr. 34. Schéma pracoviště sulfonitridace - pec VVT–100/200 NSv v Belchatowie

- Karbonitridace v plynu – nízkoteplotní

Proces karbonitridace byl proveden v karuselové peci závodu Škoda Auto - Mladá Boleslav.



Obr.35. Pec s otočnou retortou firmy ELTERMA S.A. [25]

2.3.3. Pracoviště zkoušek mikrotvrdosti

Zkoušky mikrotvrdosti byly provedeny na zařízení SOPOLEM (made in France) (obr. 36) v Institutu Materiálního Inženýrství Lodžské Polytechniky.



Obr. 36. Mikrotvrdoměr SOPOLEM (made in France)

2.3.4 Pracoviště optické mikroskopie

Mikroskopové zkoušky byly provedeny ve výzkumné stanici Technické univerzity v Liberci. Výzkumná stanice je vybavená mikroskopem NIKON EPIPHOT 200, který je propojen s počítačovým analyzátozem obrazu (obr. 37). Obraz je přenášen pomocí kamery do počítače, ve kterém je nainstalován speciální program pro analýzu obrazu z kamery.



Obr. 37. Pracoviště mikroskopových zkoušek

2.3.5. Pracoviště tribologických zkoušek

Zkoušky tribologických vlastností byly provedeny na zařízení TESTER T - 11 (obr. 38) v Institutu Materiálního Inženýrství Lodžské Polytechniky. Popis metody „Pin on disk” byl představen v podkapitole 2.2.2.



Obr. 38. Pracoviště tribologických zkoušek metodou „Pin on disk”

2.3.6. Pracoviště kvalitativní rentgenové mikroanalýzy

Kvalitativní charakteristika sulfonitridované a karbonitridované vrstvy byla provedená pomocí skenovacího elektronového mikroskopu (REM) firmy Tescan s nástavcem EDS firmy Quantax (obr.39). Zkouška byla provedená v závodě Škoda Auto - Mladá Boleslav.



Obr.39. Skenovací elektronový mikroskop firmy Tescan s nástavcem EDS
firmy Quantax



III. Praktická část

3.1. Výsledky zkoušek

3.1.1. Parametry zadané během vytváření povrchové vrstvy

a) Před procesem sulfonitridace byly vzorky odmašťovány.

Proces sulfonitridace:

- umístění vzorků v peci
- vypumpování vzduchu z retorty pece (vakuum asi 80 mbar)
- vhánění dusíku do pece
- ohřev v dusíku na teplotu 350°C
- „uzavření“ přívodu dusíku a napouštění amoniaku
- ohřívání na teplotu 540°C, během kterého je do pece přidáván pouze amoniak
- po dosažení této teploty je do pece dodatečně přidávána síra
- čas procesu sulfonitridace 6 hodin
- chlazení na 400 °C v přítomnosti amoniaku a síry
- zastavení přívodu amoniaku a výparů síry a vhánění dusíku do retorty
- chlazení v dusíku na 50°C
- vypumpování plynů z retorty (na 1 mbar) pomocí vakuové pumpy a napouštění vzduchu.

Tab.3. Parametry procesu sulfonitridace

Teplota	540°C
Čas	6 hodin



b) Před procesem karbonitridace byly vzorky umyty.

Proces karbonitridace:

- umístění vzorků v peci
- vypumpování vzduchu z retorty pece
- ohřev na teplotu 580°C
- přidávání endotermického plynu v množství 5 Nm³/hodinu a zároveň amoniaku v množství 5 Nm³/hodinu (průtok endo a amoniaku může kolísat +1 -1,5 Nm³/hodinu od nastavených hodnot)
- čas procesu karbonitridace 105 min

Tab.4. Parametry mytí vzorků před karbonitridace

Proces mytí vzorků před karbonitridace	
Praní	10 min
Kývání	5 min
Oplach	15 min
Sušení	30 min

Tab.5. Parametry procesu karbonitridace

Parametry procesu karbonitridace	
Teplota	580°C
Čas	105 min
Průtok endotermického plynu	5 Nm ³ /hodinu
Průtok amoniaku	5 Nm ³ /hodinu

Tab.6. Parametry mytí vzorků po procesu karbonitridace

Proces mytí vzorků po karbonitridování	
Praní	10 min
Kývání	5 min
Oplach	15 min
Sušení	30 min

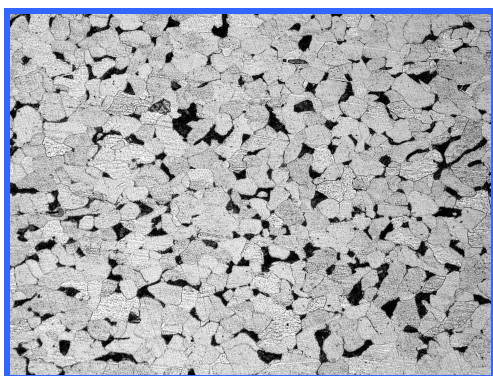


3.1.2. Mikrostruktura zkoušených povrchových vrstev a jádra

Příprava metalografických výbrusů:

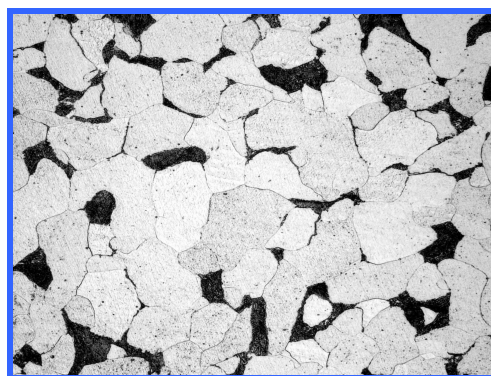
- broušení brusným papírem o hrubosti: 180, 320, 600, 800, 1200, 1500
- leštění pomocí leštičky s diamantovým kotoučem

1. vzorek bez vrstvy



jádro – ferit a perlit

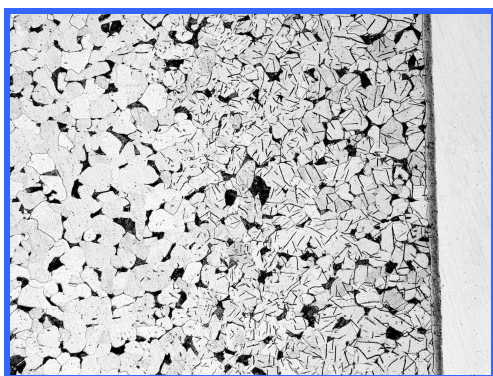
200x



jádro-ferit a perlit

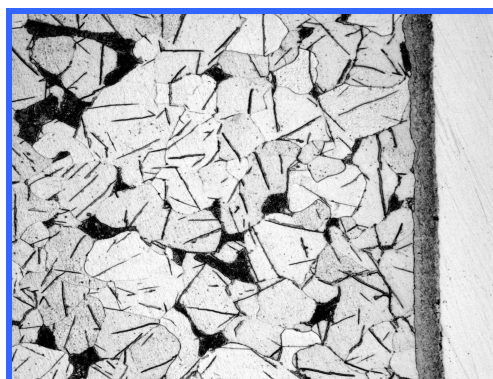
500x

2. vzorek s vytvořenou sulfonitridovanou vrstvou



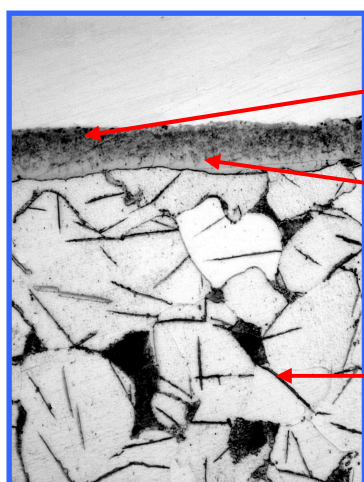
Perlit a ferit s vyloučením
nitridů γ'

200x



Perlit a ferit s vyloučením
nitridů γ'

500x



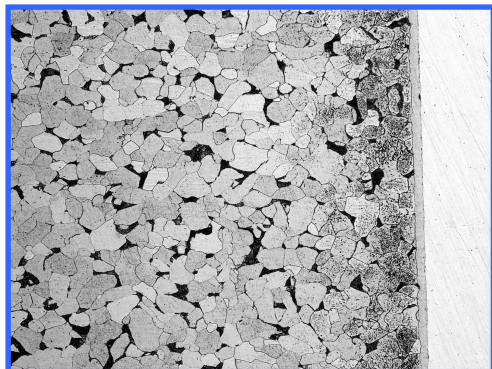
Vrstva nitridových sloučenin s
drobnými vměstky sulfidů FeS

Vrstva nitridových sloučenin
bez vměstků FeS

Vrstva vyloučení nitridů γ'
ve feritu

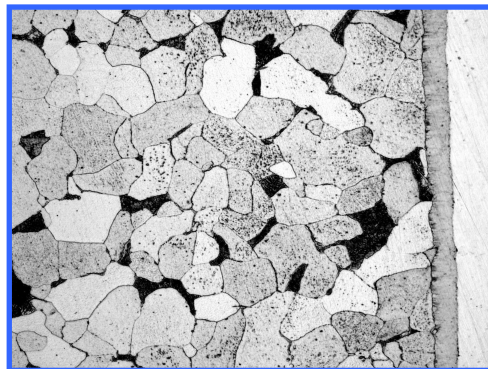
vrstva
sulfonitridovaná 1000x

3. vzorek s vytvořenou karbonitridovanou vrstvou



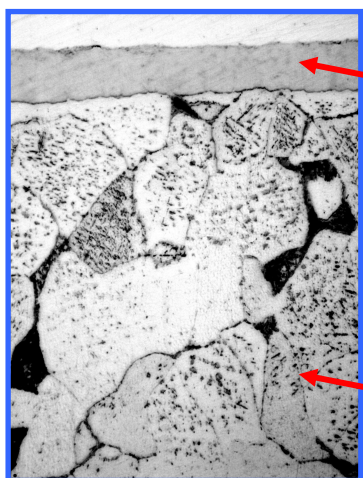
perlit a ferit

200x



perlit a ferit

500x



Zóna nitridových sloučenin ϵ
„bílá vrstva”

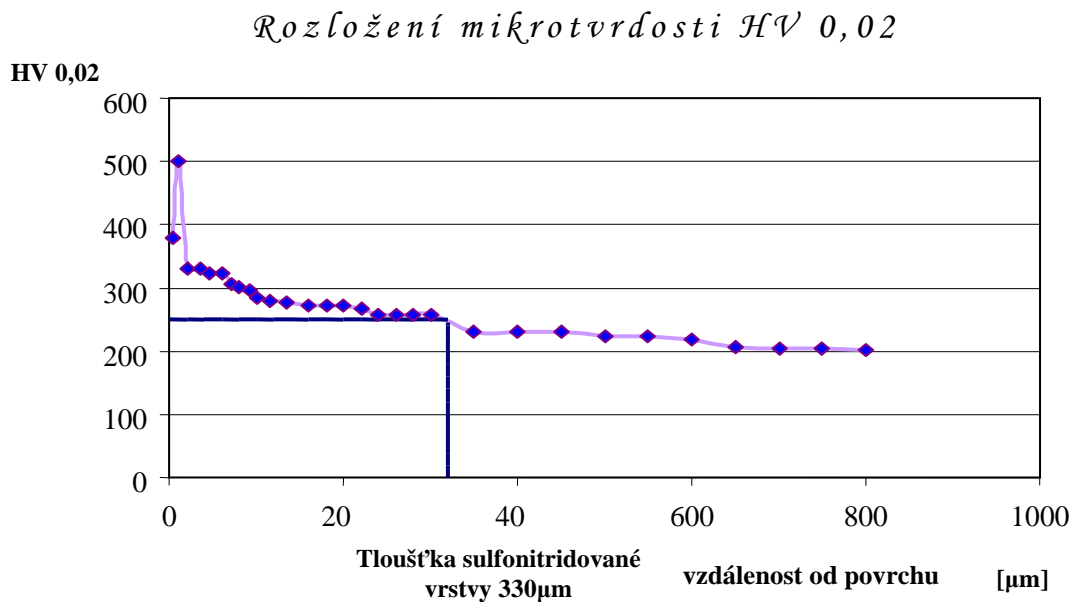
Vrstva vyloučení nitridů
ve feritu

vrstva
karbonitridovaná 1000x

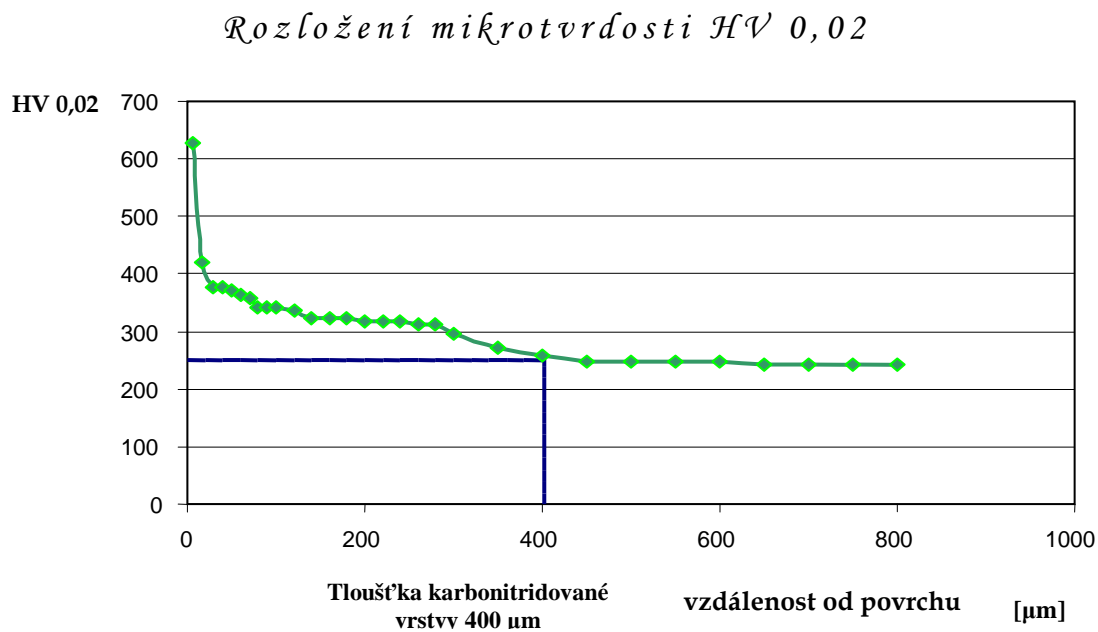


3.1.3. Zkoušky mikrotvrdosti

Tvrdost měřená podle Vickersa při zatížení 0,02kg pomocí zařízení SOPOLEM (made in France).



Obr.40. Rozložení mikrotvrdosti sulfonitridované vrstvy



Obr.41. Rozložení mikrotvrdosti karbonitridované vrstvy

**Tab.7.** Tvrdost zón sulfonitridované vrstvy

Zóny sulfonitridované vrstvy	Tvrdost [HV0,02]
Zóna drobných vměstků FeS ve fázi ϵ	378
Zóna nitridových sloučenin bez vměstků FeS (bílá vrstva)	501
Zóna vyloučenin nitridů γ' ve feritu	280

Tab.8. Tvrdost zón karbonitridované vrstvy

Zóny karbonitridované vrstvy	Tvrdost [HV0,02]
Zóna nitridových sloučenin (bílá vrstva)	626
Zóna vyloučenin nitridů γ' ve feritu	333

3.1.4. Měření tloušťky povrchových vrstev

Tloušťka vrstvy je vzdáleností od povrchu do místa, ve kterém vrstva přechází v jádro. Můžeme ji určit metalografickou metodou na leptaných metalografických výbrusech. Tloušťku vrstvy můžeme také určit měřením tvrdosti, přičemž se předpokládá, že rozměr této vrstvy je od povrchu do místa s minimální stanovenou tvrdostí, která závisí na druhu materiálu vystavovaného ke zpracování.

Tab.9. Měření tloušťky sulfonitridované vrstvy metalografickou metodou

Zóny sulfonitridované vrstvy	Tloušťka vrstvy
Zóna drobných vměstků FeS ve fázi ϵ	8 μm
Zóna nitridových sloučenin bez vměstků FeS (bílá vrstva)	5 μm
Zóna vyloučenin nitridů γ' ve feritu	340 μm

**Tab.10.** Měření tloušťky sulfonitridované vrstvy měřením tvrdosti**Tloušťka sulfonitridované vrstvy****330 μ m**

Metalografickou metodou se nepodařilo určit tloušťku karbonitridované vrstvy. Proto je třeba se řídit výsledkem tloušťky karbonitridované vrstvy získané měřením tvrdosti.

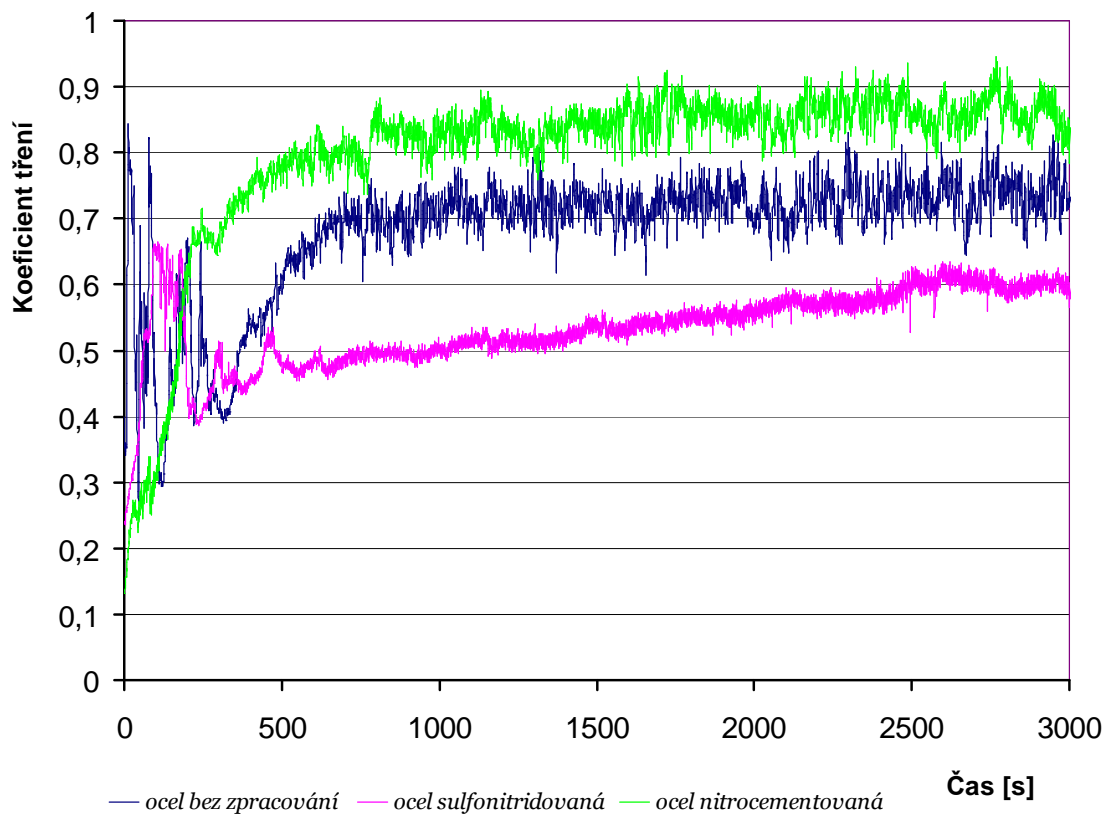
Tab.11. Měření tloušťky karbonitridované vrstvy měřením tvrdosti**Tloušťka karbonitridované vrstvy****400 μ m**

3.1.5. Tribologické zkoušky

Tato zkouška byla provedena metodou „Pin-On-Disk“, přičemž vnikacím tělískem byl váleček. Válečky byly zhotoveny z oceli C45 podle normy PN-EN 10083-1:2006 a zároveň normy ČSN – EN 10083-1. Následně byly vystaveny chemicko-tepelnému zpracování, které spočívá v karbonitridaci (za stejných podmínek jako zkoušené vzorky).

Tab.12. Parametry zadaneé během tribologických testů

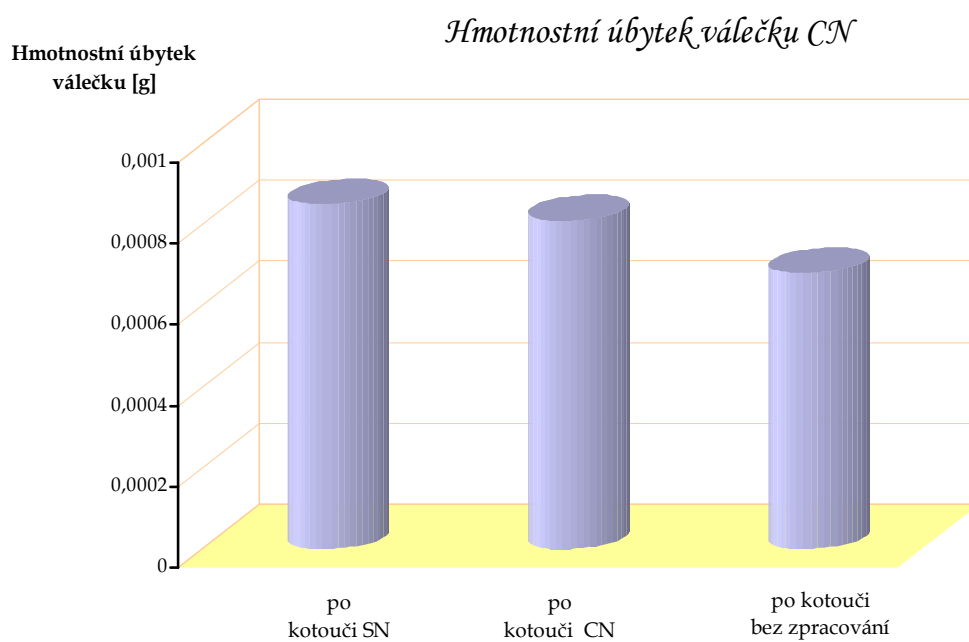
Parametry	
Třecí rychlost	0,1m/s
Třecí dráha	300m
Zatížení	1kg [10N]



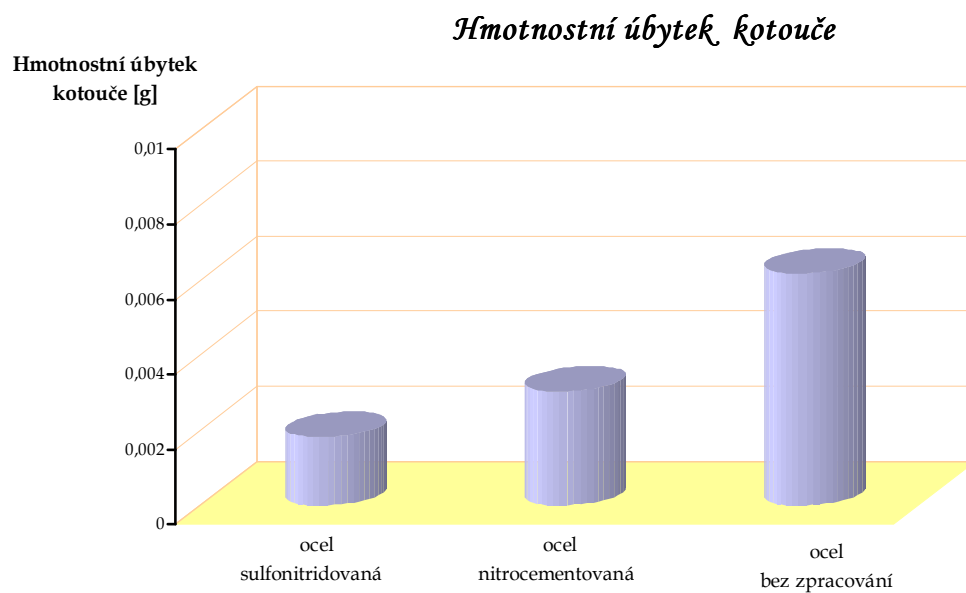
Obr.42. Průběh koeficientu tření v čase pro ocelové vzorky

Tab.13. Hmotnostní úbytek vzorků před a po procesu tření

Parametry	Sulfonitridovaný vzorek	Karbonitridovaný vzorek	Vzorek bez zpracování
Před třením	Kotouč: 23,06333g	Kotouč: 23,17767g	Kotouč: 23,03376g
	Váleček: 1,94835g	Váleček: 1,94596g	Váleček: 1,95103g
Po tření	Kotouč: 23,06150g	Kotouč: 23,17462g	Kotouč: 23,02757g
	Váleček: 1,94750g	Váleček: 1,94515g	Váleček: 1,95035g
Úbytek	Kotouč: 0,00183g	Kotouč: 0,00305g	Kotouč: 0,00619g
	Váleček: 0,00085g	Váleček: 0,00081g	Váleček: 0,00068g



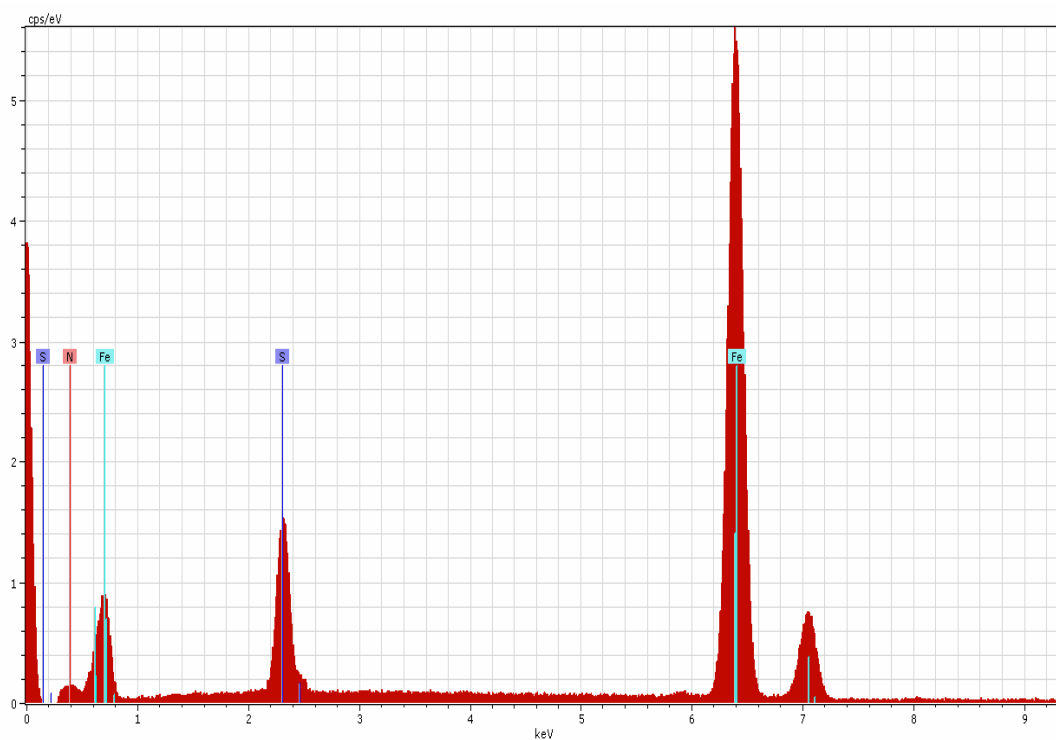
Obr.43. Hmotnostní úbytek karbonitridovaného válečku



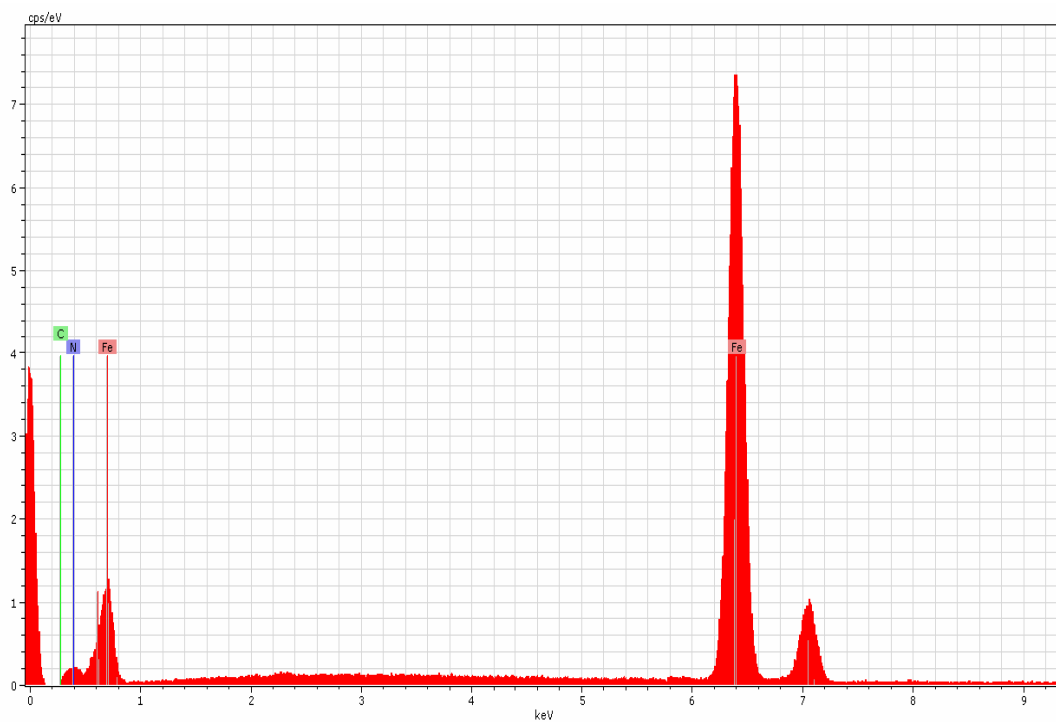
Obr.44. Hmotnostní úbytek sulfonitridovaného, karbonitridovaného a nezpracovaného kotouče



3.1.6. Kvalitativní rentgenová mikroanalýza povrchových vrstev



Obr.45. Kvalitativní mikroanalýza chemického složení sulfonitridované vrstvy



Obr.46. Kvalitativní mikroanalýza chemického složení karbonitridované vrstvy

IV. Diskuze k výsledkům

Během fotografické analýzy povrchových vrstev provedené pomocí optického mikroskopu můžeme zpozorovat, že tyto vrstvy se vyznačují výskytem zóny nitridových sloučenin tzv. „bílé vrstvy“. Struktura sulfonitridované vrstvy se skládá ze zóny nitridových sloučenin se sulfidy FeS, zóny nitridových sloučenin bez sulfidů FeS a také zóny vyloučení sulfidů γ' , ve které se vyskytují sulfidy γ' do hloubky 340 μm . Zóna nitridových sloučenin se sulfidy zkoumaná metalografickou metodou má tloušťku 8 μm . Naproti tomu zóna bez sulfidů má 5 μm . V karbonitridované vrstvě se zjišťuje výskyt „bílé vrstvy“, která má 12 μm a zároveň zóny vyloučení sulfidů ve feritu, která zkoumaná měřením tvrdosti se vyskytuje do hloubky 400 μm .

Po provedení zkoušky tvrdosti povrchových vrstev se zjišťuje, že se tyto vrstvy vyznačují poměrně vysokou tvrdostí, ačkoliv sulfonitridovaná vrstva v zóně nitridových sloučenin se sulfidy FeS se vyznačuje tvrdostí 381HV (obr.40). Tvrdost v této zóně je nižší než tvrdost v zóně nitridových sloučenin bez sulfidů (501HV), co je spojeno s výskytem sulfidů FeS, které zajišťují vhodné mazání třecích součástí. Pro karbonitridované vrstvy v „bílé vrstvě“ byla získána tvrdost 626HV (obr.41).

Analýzou průběhu tribologického testu můžeme zpozorovat, že nejlepšími vlastnostmi se vyznačuje sulfonitridovaná vrstva. Díky jejímu použití znatelně poklesl koeficient tření na hodnotu 0,6, přičemž pro karbonitridovanou vrstvu koeficient tření činí 0,9. Provedené zkoušky potvrzují možnost použití sulfonitridovaných a karbonitridovaných vrstev na součásti vystavené tření a opotřebení za účelem zlepšení jejich vlastností proti opotřebení a zároveň výrazného zvýšení životnosti. Sulfonitridace vzhledem k výsledku tribologického testu (obr.42) je lepší metodou pro použití na součásti vystavené tření a opotřebení.

Analýzou výsledků kvalitativní mikroanalýzy chemického složení se potvrzuje, že zkoušenými povrchovými vrstvami jsou sulfonitridovaná vrstva, ve které byl zjištěn výskyt síry a dusíku (obr.46) a také karbonitridovaná vrstva, ve které byl objeven uhlík a dusík (obr.47).



V. Závěry

Cílem práce bylo vytvoření sulfonitridované a karbonitridované vrstvy na konstrukční oceli za účelem dalšího zkoumání jejich tribologických vlastností. V teoretické části byla popsána používaná chemicko-tepelná zpracování a zároveň charakterizovány metody a testovací zařízení pro zkoušky tření a opotřebení. Praktická část obsahuje řadu základních zkoušek provedených na vzorcích vystavených karbonitridaci a sulfonitridaci.

Mikroskopové zkoušky proběhly na Technické univerzitě v Liberci na optickém mikroskopu NIKON EPIPHOTO 200 propojeném s počítačovým analyzátozem. Výsledky zkoušek byly znázorněny na fotografiích.

Zkoušky tvrdosti povrchových vrstev a zároveň měření tloušťky metalografickou metodou bylo provedeno v Institutu materiálního inženýrství Lodžské Polytechniky pomocí mikrotvrdoměru Soplem (obr.40,41)(tab.7,8,9).

Kvalitativní charakteristiky sulfonitridované a karbonitridované vrstvy byly provedeny pomocí skenovacího elektronového mikroskopu (REM) firmy Tescan s nástavcem EDS firmy Quantax. Zkouška byla provedená v závodě Škoda Auto - Mladá Boleslav (obr.45,46).

Tribologické zkoušky vzorků se zanesenými vrstvami byly provedeny v Institutu materiálního inženýrství Lodžské Polytechniky. Tato zkouška byla provedená pomocí zařízení Tester T-11 metodou „Pin-On-Disk”. Toto zařízení zaznamenávalo sílu tření, teplotu v blízkosti zkoušeného vzorku a také úbytky. Test byl proveden při pokojové teplotě bez použití chladících a mazacích prostředků. Výsledky zkoušek byly představeny formou grafů, na kterých byly výsledky porovnány se vzorkem bez vrstvy (obr.42).



Sulfonitridovaná vrstva se vyznačuje velmi dobrými technologickými vlastnostmi, včetně znatelně menšího koeficientu tření v porovnání s karbonitridovanou vrstvou. Díky získání nízkého koeficientu tření pro sulfonitridované vrstvy se zmenšuje opotřebení třecích ploch a razantně se zvyšuje životnost součástí a částí strojů. To způsobuje stále širší používání těchto vrstev v automobilovém průmyslu. Z ekonomického hlediska jsou sulfonitridované vrstvy s ohledem na vynikající vlastnosti velmi rentabilní investicí. O tomto především svědčí čím dál větší použití těchto vrstev na různé součásti motoru ve známých firmách vyrábějících automobily vyšší třídy.

Z ekologického hlediska metoda sulfonitridace v plynu je rovněž doporučována, a to díky moderním zařízením určeným k tomuto zpracování, které díky speciálnímu zabudovanému hořáku spalují procesní plyny tak, že neznečišťují životní prostředí. Po procesu se do atmosféry dostává dusík a vodní pára.

V této práci bylo předpokládáno vytvoření sulfonitridované a karbonitridované vrstvy na konstrukční oceli k cementaci. Přivádí na myšlenku použití sulfonitridovaných vrstev na oceli s větším podílem uhlíku např.: na cementované konstrukční oceli typu C45 podle normy ČSN – EN 10083-2 a také na oceli pro nitridaci podle normy EN 10085 a zároveň PN – EN 10085:2003 (~41CrAlMo7) za účelem analýzy vlivu sulfonitridace na tribologické vlastnosti této oceli.

Tato práce byla pořízená v rámci Programu Socrates – Erasmus Liberec – 2007/2008.



VI. Seznam obrázku

- Obr.1.** Klasifikace metod zpracování podle stavu skupenství použitého prostředí.
- Obr.2.** Klasifikace metod chemicko-tepelného zpracování podle typu nasyceného prvku.
- Obr.3.** Schéma jednokomorového pece k vakuovému cementování přizpůsobeného kalení v dusíku při tlaku do 20bar.
- Obr.4.** Koncentrace uhlíku v povrchní vrstvě po ionizační cementování.
- Obr.5.** Průběh fyzikálně-chemických jevů v nitridační atmosféře.
- Obr.6.** Příkladové stanoviště firmy Nitrex k plynovému nitridování.
- Obr.7.** Schéma konstrukce dvouretortového přístroje k technologii NITROVAC.
- Obr.8.** Schéma pece pro ionizační nitridování metodou „studených stěn komory“.
- Obr.9.** Schéma přístroje k nitridování laserového.
- Obr.10.** Schéma stanoviště pro sulfonitridování v plynném prostředí.
- Obr.11.** Schéma sulfonitridované vrstvy.
- Obr.12.** Komorový pec pro karbonitridování, vyrobený firmou Sealed Quench.
- Obr.13.** Dva typy konstrukčního řešení hermetických beden pro difúzní pokovování.
- Obr.14.** Klasifikace ověřovacích tribologických zkoušek podle Heinkeho.
- Obr.15.** Schéma metody váleček – kotouč.
- Obr.16.** Třecí uzel typu: a) váleček– kotouč b) kulička – kotouč.
- Obr.17.** Komplexní zkušební pracoviště ve spojení váleček– kotouč.
- Obr.18.** Třecí uzel ve čtyřkuličkovém přístroji.
- Obr.19.** Čtyřkuličkový přístroj s počítačovým řízením.
- Obr.20.** Třecí uzel čtyřkuličkového přístroje.
- Obr.21.** Třecí uzel typu tři válečky – kužel.
- Obr.22.** Pracoviště se spojením 3 válečky – kužel T – 04.



- Obr.23.** Třecí uzel testeru kroužek – špalek.
- Obr.24.** Pracoviště typu kroužek – špalek T – 05.
- Obr.25.** Schéma třecího uzlu kroužek - destička .
- Obr.26.** Pracoviště zkoušek otěru volným a suchým brusivem.
- Obr.27.** Třecí uzel typu váleček-prizma.
- Obr.28.** Pracoviště typu váleček-prizma T – 09.
- Obr.29.** Schéma a vzhled ozubených kol testovací převodovky.
- Obr.30.** Zařízení pro zkoušku vlivu mazacích prostředků na zadírání.
- Obr.31.** Schéma a vzhled testovacího spojení.
- Obr.32.** Pracoviště vyhodnocení odolnosti proti poškrábání T–14.
- Obr.33.** Tvar a rozměr ocelových vzorků.
- Obr.34.** Schéma pracoviště sulfonitridace - pec VVT–100/200 NSv v Bełchatowie.
- Obr.35.** Pec s otočnou retortou firmy ELTERMA S.A.
- Obr.36.** Mikrotvrdoměr SOPOLEM (made in France).
- Obr.37.** Pracoviště mikroskopových zkoušek.
- Obr.38.** Pracoviště tribologických zkoušek metodou „Pin on disk”.
- Obr.39.** Skenovací elektronový mikroskop firmy Tescan s nástavcem EDS firmy Quanta.
- Obr.40.** Rozložení mikrotvrdosti sulfonitridované vrstvy.
- Obr.41.** Rozložení mikrotvrdosti karbonitridované vrstvy.
- Obr.42.** Průběh koeficientu tření v čase pro ocelové vzorky.
- Obr.43.** Hmotnostní úbytek karbonitridovaného válečku.
- Obr.44.** Hmotnostní úbytek sulfonitridovaného, karbonitridovaného a nezpracovaného kotouče.
- Obr.45.** Kvalitativní mikroanalýza chemického složení sulfonitridované vrstvy.
- Obr.46.** Kvalitativní mikroanalýza chemického složení karbonitridované vrstvy.



VII. Seznam tabulek

- Tab.1.** Vlastnosti a použití difúzně pokovovaných vrstev.
- Tab.2.** Chemické složení v [%] konstrukční oceli k cementaci.
- Tab.3.** Parametry procesu sulfonitridace.
- Tab.4.** Parametry mytí vzorků před karbonitridace.
- Tab.5.** Parametry procesu karbonitridace.
- Tab.6.** Parametry mytí vzorků po procesu karbonitridace.
- Tab.7.** Tvrdost zón sulfonitridované vrstvy.
- Tab.8.** Tvrdost zón karbonitridované vrstvy.
- Tab.9.** Měření tloušťky sulfonitridované vrstvy metalografickou metodou.
- Tab.10.** Měření tloušťky sulfonitridované vrstvy měřením tvrdosti.
- Tab.11.** Měření tloušťky karbonitridované vrstvy měřením tvrdosti.
- Tab.12.** Parametry zadané během tribologických testů.
- Tab.13** Hmotnostní úbytek vzorků před a po procesu tření.



VIII. Použitá literatura

- [1] Kula P. Inżynieria warstwy wierzchniej. Monografie. Wyd. Politechniki Łódzkiej, Łódź 2002
- [2] Dobrzański L.A., Metaloznastwo z podstawami nauki o materiałach. Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, Warszawa 1999
- [3] Przybyłowicz K., Metaloznastwo. Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, Warszawa 1999
- [4] Przybyłowicz K., Przybyłowicz J. Materiałoznastwo w pytaniach i odpowiedziach. Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, Warszawa 2004
- [5] Gawroński Z. Technologiczna warstwa wierzchnia w kołach zębatych i mechanizmach krzywkowych. Monografie. Wyd. Politechniki Łódzkiej, Łódź 2005
- [6] Gorockiewicz R. Przyczynek do zjawisk powierzchniowych towarzyszących nawęglaniu próżniowemu stali. Inżynieria materiałowa 5, 2006, 981
- [7] Widanka K., Dudziński W. Nawęglanie próżniowe stali. Inżynieria materiałowa 5, 1999, 224
- [8] Kołodziejczyk Ł., Kula P., Olejnik J., Rzepkowski A., Siniarski D., Nawęglanie próżniowe – technologia i urządzenia przyszłości. Inżynieria materiałowa 5, 2002, 202
- [9] Pietrasik R., Kula P. Zjawiska powierzchniowe towarzyszące procesowi nawęglania próżniowego. Inżynieria materiałowa 5, 2005, 437
- [10] Michalski J., Tacikowski J., Wach P. Porównanie i cechy wspólne atmosfer azotujących w nowoczesnych procesach azotowania gazowego. Inżynieria materiałowa 5, 2005, 457
- [11] Michalski J., Wach P., Tacikowski J., Ratajski J. Wpływ kontroli i regulacji potencjału azotowego w okresie nagrzewania na tworzenie się warstw azotowych w stalach stopowych. Inżynieria materiałowa 5, 2006, 1125
- [12] Artykuł internetowy URL
<<http://www.imp.edu.pl/za/indexazot.html>> 06.04.2008r., 14:20
- [13] Kula P. Obróbka cieplno – chemiczna w próżni – perspektywy rozwoju. Inżynieria materiałowa 5, 1999, 221
- [14] Kula P., Pietrasik R. Zastosowania technologii azotonasiarczania w energetyce. VII Konferencja Naukowo-Techniczna Elektrownie Ciepłne. Bełchatów. 2005r.
- [15] Przygoński T., Pietrasik R. Technologia i nowoczesne wyposażenie do procesu azotonasiarczania. XI SEMINARIUM SECO/WARWICK. Świebodzin. 2007r.
- [16] Artykuł internetowy URL
<http://www.ppt.belchatow.pl/viewpage.php?page_id=7> 12.04.2008r., 10:50



- [17] Gjulihandanow J.L., Budzynowski T.W., L'vovič E. Nawęglanie, węgloazotowanie, azotowanie stali: zagadnienia wybrane. Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom 2003
- [18] Artykuł internetowy URL
<<http://www.elterma.com.pl/pl/produkty>> 11.04.2008r., 18:30
- [19] Lawroński Z., Tarcie, zużywanie i smarowanie. PWN, Warszawa 1993
- [20] Szczerek M., Wiśniewski M. Tribologia i tribotechnika. Instytut Technologii Eksploatacji, Radom 2000
- [21] Rzepkowski A., Gawronski Z. Ocena właściwości tribologicznych technologicznej warstwy wierzchniej azotowanej próżniowo nierdzewnej stali martenzytycznej utwardzanej wydzieleniowo. Inżynieria materiałowa 5, 2006, 1200
- [22] Artykuł internetowy URL
<<http://www.tribologia.org/ptt/inst/rad/ITeE-PIB.htm#0p>> 11.03.2008r, 14:30
- [23] Artykuł internetowy URL
<<http://www.tribologia.org/ptt/try/tr.htm>> 11.03.2008r., 17:00
- [24] Lexikon technických materiálů 2.0, vyšlo: leden 2001
- [25] Artykuł internetowy URL
<http://www.elterma.com.pl/pl/produkty/Inne_piece_przelotowe.html>
15.05.2008r., 9:00